

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»
РОССИЙСКАЯ АССОЦИАЦИЯ НЕЙРОИНФОРМАТИКИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2017

ХІХ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ЧАСТЬ 2

- **НЕЙРОННЫЕ СЕТИ И КОГНИТИВНЫЕ НАУКИ**
- **НЕЙРОСЕТЕВЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ,
РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ И УПРАВЛЕНИЯ**
- **НЕЙРОБИОЛОГИЯ**
- **АДАПТИВНОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИОННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ**
- **ТЕОРИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

МОСКВА

УДК 001(06)+004.032.26(06)
ББК 72Я5+32.818Я5
М 82

**ХІХ МІЖДУНАРОДНА НАУЧНО-ТЕХНІЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦІЯ
«НЕЙРОІНФОРМАТИКА-2017»: Сборник научных трудов.** В 2-х частях.
Ч. 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. – 208 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу ХІХ МІЖДУНАРОДНОЇ НАУЧНО-ТЕХНІЧЕСКОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «НЕЙРОІНФОРМАТИКА-2017», проходившей в г. Москве 2–6 октября 2017 г. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: методические вопросы нейроинформатики, теория нейронных сетей, нейробиология, модели адаптивного поведения и когнитивные исследования, нейронные сети для управления, обработки изображений, временных рядов и другие приложения нейроинформатики.

Во вторую часть включены доклады, посвященные моделированию в нейробиологии, когнитивным исследованиям, теоретическим исследованиям искусственных нейронных сетей и применению нейронных сетей в задачах управления, прогнозирования и распознавания образов.

Ответственный редактор *А.Г. Трофимов*

Статьи получены до 15 июня 2017 года.
Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2401-5

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2017

Оригинал-макет подготовлен *М.В. Макаровой*

Подписано в печать 10.09.2017. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 13,0. Тираж 150 экз. Заказ № 121.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Типография НИЯУ МИФИ
115409, Москва, Каширское ш., 31*

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Российская академия наук
- Министерство образования и науки Российской Федерации
- Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
- Российская ассоциация нейроинформатики
- Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)
- Научно-исследовательский институт системных исследований РАН (НИИСИ РАН)
- Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ
- Государственный научный центр РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель – Оныкий Б. Н. (НИЯУ МИФИ, Москва)

Зам. председателя – Мисюрин С. Ю. (НИЯУ МИФИ, Москва)

Зам. председателя – Тюменцев Ю. В. (МАИ, Москва)

Акопов Э. И. – НИИСИ РАН, Москва

Акад. РАН Бетелин В. Б. – НИИСИ РАН, Москва

Акад. РАН Евтушенко Ю. Г. – ВЦ РАН им. А.А. Дородницына, Москва

Загребаев А. М. – НИЯУ МИФИ, Москва

Климов В. В. – НИЯУ МИФИ, Москва

Скрипко О. Ю. – НИЯУ МИФИ, Москва

Трофимов А. Г. – НИЯУ МИФИ, Москва

Ученый секретарь – Бесхлебнова Г. А. (НИИСИ РАН, Москва)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель – чл.-кор. РАН Крѳжановский Б.В. (НИИСИ РАН, Москва)

Зам. председателя – Дунин-Барковский В.Л. (НИИСИ РАН, Москва)

Сопредседатель – Gorban A. (University of Leicester, Great Britain)

Сопредседатель – Редько В.Г. (НИИСИ РАН, Москва)

Abraham A. – Machine Intelligence Research Labs (MIR Labs), Washington, USA

Baidyk T. – The National Autonomous University of Mexico (UNAM)

Borisyuk R. – Plymouth University, United Kingdom

Cangelosi A. – Plymouth University, United Kingdom

Dolev S. – Ben-Gurion University of the Negev, Israel

Dosovitskiy A. – Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany

Dudkin A. – United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

Golovko V.A. – Brest State Technical University, Belarus

Hayashi Y. – Meiji University, Kawasaki, Japan

Husek D. – The Institute of Computer Science of Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague

Izhikevich E. – Braincorporation, San Diego, USA

Jankowski S. – Warsaw University of Technology, Poland

Kecman V. – Virginia Commonwealth University, USA

Kernbach S. – Cybertronica Research, Research Center of Advanced Robotics and Environmental Science, Stuttgart, Germany

Koprinkova-Hristova P. – Institute of Information and Communication Technologies, Sofia, Bulgaria

Kussul E. – The National Autonomous University of Mexico (UNAM)

Narynov S. – Alem Research, Almaty, Kazakhstan

Pareja-Flores C. – Universidad Complutense de Madrid, Spain

Prokhorov D. – Toyota Research Institute of North America, USA

Rutkowski L. – Czestochowa University of Technology, Poland

Samsonovich A.V. – George Mason University, USA

Sandamirskaya Y. – Institute of Neuroinformatics, University of Zurich, Switzerland

Sirota A. – Ludwig-Maximilians-Universität, München, Germany

Snasel V. – Technical University Ostrava, Czech Republic

Tikidji-Hamburyan R. – Louisiana State University, USA

Tsodyks M. – Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel
Tsoy Y. – Institut Pasteur Korea, Republic of Korea
Чл.-кор. РАН Анохин К.В. – НИЦ «Курчатовский институт», Москва
Чл.-кор. РАН Балабан П.М. – ИВНД и НФ РАН, Москва
Бурцев М.С. – МФТИ, Москва
Введенский В.Л. – НИЦ «Курчатовский институт», Москва
Чл.-кор. РАН Величковский Б.М. – НИЦ «Курчатовский институт», Москва
Доленко С.А. – НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва
Ежов А.А. – ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва
Жданов А.А. – ИТМиВТ РАН, Москва
Чл.-кор. РАН Иваницкий А.М. – ИВНД и НФ РАН, Москва
Каганов Ю.Т. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Казанович Я.Б. – ИМПБ РАН – филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
Московская область, Пущино
Литинский Л.Б. – НИИСИ РАН, Москва
Макаренко Н.Г. – ГАО РАН, Санкт-Петербург
Мишулина О.А. – НИЯУ МИФИ, Москва
Нечаев Ю.И. – Заслуженный деятель науки Российской Федерации
Академик РАН Рудаков К.В. – ВЦ РАН им. А.А. Дородницына, Москва
Самарин А.И. – НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана
Южного федерального университета, Ростов-на-Дону
Терехов С.А. – ЗАО «Связной Логистика», Москва
Трофимов А.Г. – НИЯУ МИФИ, Москва
Тюменцев Ю.В. – МАИ, Москва
Ушаков В.Л. – НИЦ «Курчатовский институт», Москва
Фролов А.А. – ИВНД и НФ РАН, Москва
Чижов А.В. – Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Шумский С.А. – ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
Яхно В.Г. – ИПФ РАН, Нижний Новгород

Уважаемые коллеги!

Конференция НЕЙРОИНФОРМАТИКА вновь собирает исследователей, работающих по актуальным направлениям теории и приложений искусственных нейронных сетей. Как и на предыдущих наших собраниях, в этом году на конференции НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2017 представлены доклады по проблемам теории нейронных сетей, нейробиологии, моделям адаптивного поведения, нейросетевому моделированию объектов и систем, обработке статистических данных, временных рядов и изображений и многим другим прикладным задачам нейроинформатики.

Более 200 российских ученых и наших зарубежных коллег направили в оргкомитет конференции результаты своих исследований.

По сложившейся традиции конференцию открывают приглашенные доклады. В рамках школы-семинара участники конференции прослушают лекции известных специалистов по актуальным проблемам нейроинформатики. На рабочем совещании участники конференции обсудят перспективные проекты по созданию прикладных интеллектуальных систем.

Особое внимание уделяется работам студентов, аспирантов и молодых специалистов, которые примут участие в творческом конкурсе.

За прошедшие годы конференция НЕЙРОИНФОРМАТИКА сложилась как представительный и многоплановый по тематике научный форум. В его работе принимают участие и известные ученые, и молодые специалисты, аспиранты и студенты. Желаем всем участникам конференции плодотворной работы, активно-го сотрудничества и новых творческих идей.

Оргкомитет

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 4

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ И КОГНИТИВНЫЕ НАУКИ

МЕЙЛИХОВ Е.З., ФАРЗЕТДИНОВА Р.М. Видность изображения – контраст цвета или яркости?.....	11
ХАРЫБИНА З.С. Влияние границ окружения на пространственное представление клеток места в модели нейродинамики пространственной навигации, основанной на сетях с четным циклическим торможением.....	21
ПОЛЕВАЯ С.А., ЧЕРНИГОВСКАЯ Т.В., ПАРИНА И.С., КОНИНА А.А., АЛЕКСЕЕВА С.А., ДЕМАРЕВА В.А., КНАБЕНГОФ М.А., ПАРИН С.Б. Динамика ритма сердца при взаимодействии информационных образов в процессе синхронного перевода и в тесте Струпа.....	30
КНЯЗЕВА И.С., БОЙЦОВА Ю.А., МАКАРЕНКО Н.Г., ДАНЬКО С.Г., ЕФИТОРОВ А.О., ЗЕЛЕНКИНА Д.А. Использование фазовой вейвлет когерентности для исследования состояний с разной степенью выраженности ментального и сенсорного внимания.....	40
ФИЛАТОВА Н.Н., СИДОРОВ К.В., ШЕМАЕВ П.Д. Мониторинг характеристик аттракторов для оценки изменений эмоционального состояния человека.....	48
ЭЙДЛИН А.А., САМСОНОВИЧ А.В. Построение слабых семантических карт смыслов слов.....	57
СИЛЬКИС И.Г. Нейронная сеть, обеспечивающая восприятие физических свойств и субсекундных временных параметров сенсорных стимулов.....	64
КУЗНЕЦОВ О.П., ЖИЛЯКОВА Л.Ю., ДЬЯКОНОВА В.Е., САХАРОВ Д.А., БАЗЕНКОВ Н.И., КУЛИВЕЦ С.Г. О дискретном моделировании мультитрансмиттерных взаимодействий в простых нервных системах.....	74
КАЗАНОВИЧ Я.Б., БУРИЛКО О., БОРИСЮК Р.М. Победитель получает все в сети фазовых осцилляторов.....	82

Секция 5

**НЕЙРОСЕТЕВЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ,
РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ И УПРАВЛЕНИЯ**

МАРУШКО Е.Е., ДУДКИН А.А.
Долгосрочный прогноз параметров системы
электрообеспечения космических аппаратов91

ЛИТВИН А.А., ЖАРИКОВ О.Г., КОВАЛЕВ В.А.
Система прогнозирования и диагностики
инфицированного панкреонекроза
на основе искусственных нейронных сетей.....98

Секция 6

НЕЙРОБИОЛОГИЯ

САМАРИН А.И., ПОДЛАДЧИКОВА Л.Н.,
ПЕТРУШАН М.В., ШАПОШНИКОВ Д.Г.
Возможные стратегии выбора областей на периферии
поля зрения для фиксации взгляда..... 107

СМИРНИТСКАЯ И.А.
Иерархические уровни управления локомоциями,
от спинального до диэнцефалического 115

СМИРНИТСКАЯ И.А.
Павловско-инструментальный перенос и система,
управляющая поведенческим выбором 123

ЧЕРНОИВАНОВ В.И., СУДАКОВ С.К., ТОЛОКОННИКОВ Г.К.
Категорная теория систем,
функциональных систем и биомашсистем. Часть 1..... 131

ЧЕРНОИВАНОВ В.И., СУДАКОВ С.К., ТОЛОКОННИКОВ Г.К.
Категорная теория систем,
функциональных систем и биомашсистем. Часть 2..... 139

БАЗЯН А.С.
Модель Хебба и современные представления
о молекулярных и клеточных механизмах памяти 148

ДИК О.Е.
О возможности модуляции ноцицептивных сигналов 158

РАТУШНЯК А.С., ЗАПАРА Т.А.,

ПРОСКУРА А.Л., СОРОКОУМОВ Е.Д.

О подходе к моделированию нейронов как системы
многоуровневых, автономных, ассоциативно обучающихся,
прогностических, супрамолекулярных агентов 168

Секция 7

АДАПТИВНОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

СКОБЦОВ Ю.А., ЧЕНГАРЬ О.В.

Экспериментальное исследование «направленного»
муравьиного алгоритма оптимизации
производственного расписания 176

Секция 8

ТЕОРИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

КАРАНДАШЕВ Я.М., КРЫЖАНОВСКИЙ Б.В., МАЛЬСАГОВ М.Ю.

Аналитические выражения для двумерной модели Изинга
конечных размеров 186

ТАРКОВ М.С.

Редукция синапсов сети Хопфилда 197

Именной указатель авторов 205

Секция 4

Нейронные сети и когнитивные науки

Е.З. МЕЙЛИХОВ^{1,2}, Р.М. ФАРЗЕТДИНОВА¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

meilikhov@yandex.ru

ВИДНОСТЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ – КОНТРАСТ ЦВЕТА ИЛИ ЯРКОСТИ?

Количественно (в рамках простой аналитической модели) обоснуется утверждение о том, что «цветной мир» поддается более точной и более быстрой сегментации, чем «серый мир». Это приводит к существенному облегчению условий возникновения жизненно необходимого эффекта выскакивания, а также, вероятно, лежит в основе многих других когнитивных явлений, связанных с цветовым зрением.

Ключевые слова: *векторная модель цветового зрения, эффект выскакивания, аналитическая теория видности.*

Введение

Быстрый анализ сложных изображений требует высокоскоростного выделения объекта из фона. Этот процесс основан на регистрации существенных изменений какого-либо физического признака изображения при переходе от объекта к фону (и обратно), т.е. локального контраста этого параметра при переходе через границу между ними [1]. Таким физическим признаком может быть цвет изображения, размер, форма его деталей и др.

Как правило, любой из этих признаков может быть количественно описан соответствующим физическим параметром: например, цвет – длиной волны (или набором длин волн), форма – совокупностью таких геометрических характеристик, как кривизна, наклон, симметрия и т.д. [2]. В любом случае наличие участка картины, где значение этого параметра сильно отличается от его величины на соседних участках, является необходимым условием быстрого и легкого («автоматического») выделения объекта [4, 5, 6]. В этом – суть так называемого эффекта «выскакивания» (pop-out effect), при котором перцептивно «очевидная» область (или деталь изображения) легко и самопроизвольно выделяется с первого взгляда.

Если признаки фигуры не уникальны, то легкого выделения объекта не происходит. По-видимому, существует некий, характерный для каждого признака, *порог*, превышение которого необходимо для появления эффекта выскакивания. Например, цветовое или геометрическое различие между целевым стимулом и дистракторами должно быть достаточно сильным [7], причем при наличии разнородных различий срабатывает наиболее сильное из них [8, 9]. В ряде работ предпринимались попытки целевого управления эффективностью зрительного поиска путем варьирования степени различия между целевым стимулом и дистракторами [10].

Существуют различные компьютерные программы (см., например, [11]), производящие сегментацию изображения путем выделения границ отдельных участков изображения [12]. Однако для эффективной работы они часто требуют определенной «подсказки» со стороны человека.

В настоящей работе мы представляем феноменологическую (но аналитическую!) модель эффекта выскакивания.

Для этого, прежде всего, надо определить, что такое «задний план» (фон). Согласно словарю [13], фон – это «общая основа, на которой выделяется кто-нибудь (что-нибудь), обстановка, окружение, где происходит какое-нибудь событие, протекает какое-нибудь явление».

Фон, как правило, содержит меньше деталей, чем передний план, и на нем как раз и «выделяется» кто-нибудь/что-нибудь, отличающееся от фона относительным обилием деталей, то есть обилием границ между участками с различающимися физическими параметрами. В каждой точке такой границы абсолютная величина градиента выбранного параметра в направлении нормали к границе принимает гораздо большее значение, чем в других точках. Таким образом, усредняя величину этого градиента по области с размером порядка среднего размера объектов, мы обнаружим, что в той части изображения, где деталей много, эта средняя величина относительно велика, а там, где деталей немного, она – мала. Это обстоятельство может быть положено в основу алгоритма выделения фона или переднего плана, а значит, и границ.

Видность цветной картины

Перейдем теперь к аналитическому анализу видности цветных изображений на примере задачи о различимости (фиксации положения) границы между полосами *разного* цвета. В рамках нашей модели мы будем сначала исходить из того, что характеристики яркости и цвета не смешиваются друг с другом (т.е. не будем пока учитывать того обстоятельства, что смешение оппонентных цветов может уничтожать хроматичность, сохраняя ненуле-

вую яркость, и т.д. [18]). Этим двум локальным, зависящим от координат, характеристикам изображения поставим в соответствие два отдельных, не зависящих друг от друга, параметра (типа амплитуды и фазы волновой функции в квантовой механике). Пусть изображение плоско и двухцветно и представляет собой совокупность размытых параллельных друг другу полос двух различных цветов (для определенности – красных и желтых). Для дальнейшего проще всего считать рисунок растровым, то есть состоящим из большого числа точек красного (r) и желтого (y) цвета, плотности которых и создают субъективное ощущение цвета.

Для указанных двух цветов введем комплексные параметры $A_r(\mathbf{r})e^{i\phi_r}$ и $A_y(\mathbf{r})e^{i\phi_y}$, зависящие от координат \mathbf{r} . Здесь $A_r(\mathbf{r})$, $A_y(\mathbf{r})$ – пространственные зависимости средней амплитуды напряженности поля световых волн для каждой из двух длин волн, а ϕ_r , ϕ_y – «цветовые фазы» (i – мнимая единица)¹. Эти фазы являются, по существу, «кодами» цветового тона, условными параметрами, которые в предлагаемой модели не зависят от интенсивностей света выбранных цветовых тонов, а зависят только от их длин волн. Принимается, что комплексные цветовые параметры каждой малой области двухцветной растровой картины аддитивны (обобщенный аналог закона Эбни [18]), и суммарный комплексный параметр $A(\mathbf{r})e^{i\phi(\mathbf{r})}$, включающий суммарную цветовую амплитуду $A(\mathbf{r})$ и суммарную цветовую фазу $\phi(\mathbf{r})$, может быть найден с помощью соотношения

$$A(\mathbf{r})e^{i\phi(\mathbf{r})} = A_r(\mathbf{r})e^{i\phi_r} + A_y(\mathbf{r})e^{i\phi_y}, \quad (1)$$

определяющего правила сложения комплексных чисел или векторов. Из этого соотношения следует

$$A(\mathbf{r}) = \sqrt{A_r^2(\mathbf{r}) + A_y^2(\mathbf{r}) + 2A_r(\mathbf{r})A_y(\mathbf{r})\cos\Delta\phi}, \quad (2), (3)$$

$$\phi(\mathbf{r}) = \phi_r + \arcsin\left[\frac{A_y(\mathbf{r})}{A(\mathbf{r})}\sin\Delta\phi\right],$$

где $\Delta\phi = \phi_y - \phi_r$. Как и следовало ожидать, $\phi = \phi_r$ при $A_y = 0$ и $\phi = \phi_r + \Delta\phi = \phi_y$ при $A_r = 0$. В общем случае ($A_r, A_y \neq 0$) имеем

¹ Мы ограничимся рассмотрением двухцветных изображений, которым соответствует плоское (двумерное) пространство цветовых тонов. Именно такое пространство можно описать с помощью комплексных чисел (или векторов с полярными координатами A , ϕ). Обращение к трехцветному (а значит и трехмерному) пространству привело бы к усложнению модели.

$\phi_r < \phi < \phi_y$, что соответствует второму закону Грассмана: смешение двух цветов дает цвет, тон которого лежит (на цветовом круге) между смешиваемыми цветами. Это – не объективный закон физики, а закон *субъективного* восприятия цвета; аналогом цветовой фазы ϕ в теории цветового зрения [26] является полярный угол цветового круга (измеряемый в градусах или радианах).

В физической оптике фаза волны пропорциональна волновому числу $k \propto 1/\lambda$, которое обратно пропорционально длине волны. Поэтому, оставаясь в рамках принятой модели, мы используем ниже не психофизическую зависимость $\phi(\lambda)$, а функцию $\phi(1/\lambda)$ (хотя это совершенно не принципиально). Численные значения цветовых фаз ϕ_r , ϕ_y – произвольны, и мы вольны выбрать их любым удобным способом. Если отталкиваться от традиционной формы цветового круга, в котором видимому спектру соответствует интервал углов от 0 до 2π , то можно, например, определить цветовую фазу приближенным соотношением $\phi = 4\pi(\lambda_r/\lambda - 1)$, в котором $\lambda_r \approx 650$ нм – длина волны красного света. В соответствии с этим соотношением цветовая фаза красного цвета равна $\phi_r = 0$, желтого света – $\phi_y \approx \pi/2$, зеленого света – $\phi_g \approx \pi$ и фиолетового – $\phi_b \approx 2\pi$. Принятый способ кодирования является, по существу, не чем иным, как аналитической версией известного цветового пространства DKL [19, 20], в котором цвет кодируется одним из углов цветового пространства (меняющимся в пределах от 0 до 2π).

Для простоты рассмотрим далее цветную картину из двух цветов – красного и желтого, для которых $\phi_r = 0$, $\Delta\phi = \phi_y - \phi_r = \pi/2$. В этом случае соотношения (2) принимают существенно более простой вид¹:

$$A(\mathbf{r}) = \sqrt{A_r^2(\mathbf{r}) + A_y^2(\mathbf{r})}, \quad \phi(\mathbf{r}) = \arcsin \left[\frac{A_y(\mathbf{r})}{\sqrt{A_r^2(\mathbf{r}) + A_y^2(\mathbf{r})}} \right]. \quad (4)$$

¹Упрощение соотношений (4) по сравнению с исходными соотношениями (2), (3) связано со сделанным выше «принудительным» выбором цветовых фаз, при котором $\phi_y \approx \pi/2$. Можно убедиться, что все заключения о видности цветных картин остаются в силе и при другом выборе зависимости $\phi(\lambda)$. Это связано с тем, что актуальными являются не численные значения цветовых фаз, а градиент фазы вдоль направления ее быстрого изменения, то есть относительная характеристика, аналогичная видности (контрастности) картины – в данном случае «картины» изменения фазы.

Первое из этих соотношений соответствует так называемому закону аддитивности яркости Эбни [18], а второе, как и требуется, дает $\phi = 0$ при $A_y = 0$ (только красный цвет) и $\phi = \pi/2$ при $A_r = 0$ (только желтый цвет).

Итак, цветовой картине соответствуют две пространственные функции: цветовая амплитуда $A(\mathbf{r})$ и цветовая фаза $\phi(\mathbf{r})$. Субъективное восприятие картины происходит через регистрацию изменений этих функций и, в основном, той из них, относительные изменения которой больше.

Обсудим в этой связи два примера. В первом из них мы рассмотрим картину, представляющую собой периодическую (вдоль оси x) структуру чередующихся красных и желтых параллельных полос с единичным расстоянием между центрами. Каждая полоса размыта, и ее локальная яркость спадает от центра (координаты центров $x_n = 2n$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – красные полосы, $x_n = 2n + 1$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – желтые полосы) к периферии по гауссовому закону

$$A_r(x - x_n), A_y(x - x_n) = F_n(x), \quad F_n(x) = A_0 \exp\left[-\frac{(x - x_n)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (5)$$

где A_0 – световые амплитуды в центре всех полос; σ – эффективная ширина их размытия.

В соответствии с (4) цветовая амплитуда и цветовая фаза в произвольной точке x на линии, перпендикулярной полосам, равна

$$A(x) = \sqrt{\hat{A}_r^2(x) + \hat{A}_y^2(x)}, \quad \phi(x) = \arcsin\left[\frac{\hat{A}_y(x)}{\sqrt{\hat{A}_r^2(x) + \hat{A}_y^2(x)}}\right], \quad (6)$$

где

$$\hat{A}_r(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{2n}(x), \quad \hat{A}_y(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{2n+1}(x). \quad (7)$$

Какая из двух функций $A(x)$ или $\phi(x)$ меняется сильнее? Ответ на этот вопрос зависит от степени размытия каждой полосы, определяемой величиной параметра σ . Соответствующие зависимости $A(x)$ и $\phi(x)$ представлены на рис. 1 для четырех различных значений параметра $\sigma = 0,2; 0,5; 0,75; 1$. Если полосы имеют резкие края $\sigma \ll 1$, то $A(x)$ меняется в пределах от 0 до 1 [см. (5)], а $\phi(x)$ – от 0 до $\pi/2$ [см. (6)], т.е. практически одинаково. При существенном, но умеренном размытии полос ($\sigma \sim 1$) относительное изменение $A(x)$ составляет всего несколько процентов, в то

время как фаза $\phi(x)$, по-прежнему, меняется в два-три раза. И, наконец, при очень сильном размытии полос ($\sigma \geq 1$), когда они значительно перекрываются, цветовые параметры практически не зависят от координат, и картина представляет собой слабоконтрастный, почти однородный фон, на котором нельзя выделить никаких деталей.

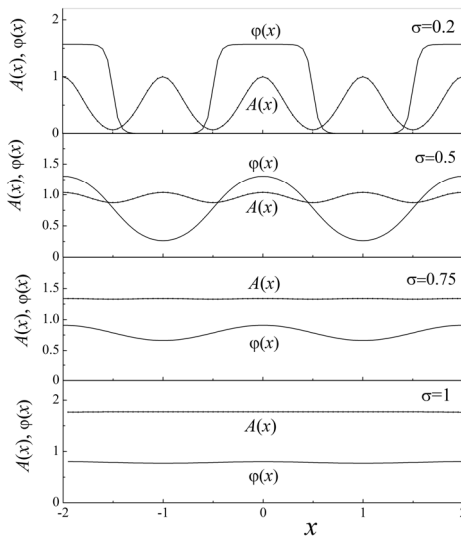


Рис. 1. Пространственные зависимости световой амплитуды $A(x)$ и цветовой фазы $\phi(x)$ системы чередующихся по цвету (красный и желтый) размытых параллельных полос для различных параметров размытия σ

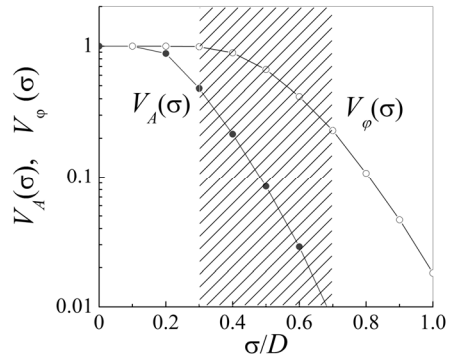
Количественной характеристикой видности картины является коэффициент модуляции того или иного параметра, определяемый как отношение

$$V_A = (A_{\max} - A_{\min}) / (A_{\max} + A_{\min}) \quad \text{или} \quad V_\phi = (\phi_{\max} - \phi_{\min}) / (\phi_{\max} + \phi_{\min}),$$

где индексы \min и \max относятся к максимальному и минимальному значению рассматриваемого параметра (в данном случае – световой амплитуды A и цветовой фазы ϕ изображения).

Как видно из рис. 2, при умеренном размытии деталей ($\sigma = 0,3 - 0,7$) контраст цветовой фазы на порядок выше контраста амплитуды. Означает ли это, что видность картины и эффект выскакивания связаны именно с цветовым (а не амплитудным) контрастом? Вообще говоря – нет, если соответствующие пороги восприятия так же сильно отличаются (например, если индивидуальная пороговая контрастность амплитуды на порядок ниже пороговой цветовой контрастности, то различия в коэффициентах V_A и V_ϕ нивелируются, и яркостное восприятие становится не менее важным, чем цветовое).

Рис. 2. Яркость V_A и цветовая V_ϕ видности системы размытых параллельных полос. Заштрихован интервал значений σ/D (D – расстояние между центрами полос, σ – ширина гауссовой функции размытия), где цветовая видность на порядок выше контраста амплитуды



Ответ на вопрос дают эксперименты. Известно, что человеческий глаз способен различать градации яркости (обладает контрастной чувствительностью) порядка 1 % [21], что соответствует порогу относительного изменения коэффициента амплитудной модуляции $\delta V_A/V_A \sim 10^{-2}$. Аналогично, глаз различает цвета, соответствующие разности длин волн излучения 1–5 нм [22] (спектральная чувствительность). Это соответствует порогу относительного изменения коэффициента цветовой модуляции $\delta V_\phi/V_\phi \approx (0,1-0,5) \cdot 10^{-2} \sim \delta V_A/V_A$. Указанные пороги чувствительности к изменению яркости или цвета относятся к идеальным условиям наблюдения. Реальные пороги на порядок выше, но по величине остаются одного порядка: $\sim \delta V_A/V_A \approx \delta V_\phi/V_\phi \sim 0,1$. Это позволяет заключить, что при умеренном размытии полос картина надежнее (а значит, и быстрее) воспринимается через изменение цветовой фазы (то есть, цвета), а не через изменение световой амплитуды (т.е. яркости). Например, выделение желтых полос на красном фоне происходит надежнее и быстрее, чем выделение ярко-красных полос на умеренно красном фоне. Этот вывод подтверждается экспериментально найденными функциями контрастной чувствительности, описывающими восприятие *модулированных по цвету* (красно-зеленых или сине-желтых) решеток постоянной яркости и *модулированных по яркости* одноцветных (зеленых и желтых) решеток [23, 24]. Эксперименты показывают, что для пространственных частот менее $\sim 0,2$ период/град (пока физиологические ограничения еще не важны) контрастная чувствительность при наблюдении хроматической решетки превосходит (до пяти раз при пространственной частоте $\approx 0,07$ период/град) таковую для амплитудной решетки. Этот результат вполне согласуется с приведенным выше выводом о большей цветовой контрастности картины.

Отдельного рассмотрения требует случай с полосами двух дополнительных (или «почти дополнительных») цветов, цветовые фазы которых отличаются приблизительно на π (например, красного и зеленого). Смешение их потоков с близкими интенсивностями приводит к формированию ахроматического, или серого, цвета. В этом случае картина чередующихся по цвету полос будет представлять собой цветные полосы на сером фоне. Амплитуда серого цвета равна $A_{\text{gray}}(x) = \text{Min}[A_r(x), A_g(x)]$, а амплитуда окрашенного – $A_{\text{opp}}(x) = |A_r(x) - A_g(x)|$, где $A_r(x)$, $A_g(x)$ – локальные амплитуды красного (r) и зеленого (g) света. Соответствующие зависимости приведены на рис. 3. По мере размытия полос (при увеличении параметра σ) интенсивность серого цвета растет, однако даже при $\sigma \approx 1$ почти однородный серый фон не исключает возможности различения малоинтенсивных цветных полос. Это означает, что использование дополнительных цветов, вообще говоря, повышает видность картины.

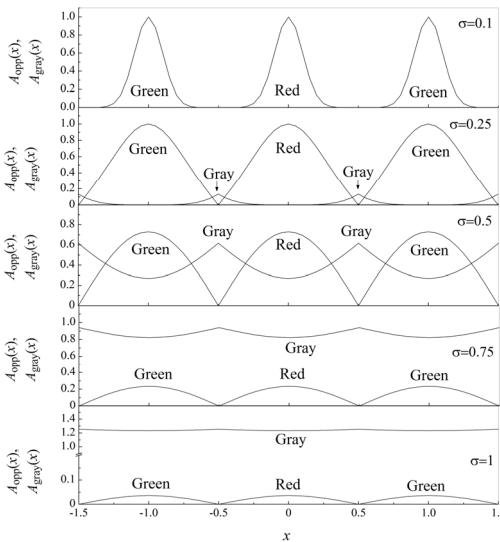


Рис. 3. Пространственные зависимости световых амплитуд $A_{\text{gray}}(x)$, $A_{\text{opp}}(x)$ серого фона (Gray) и цветных полос (Green, Red) для системы чередующихся размытых параллельных полос *дополнительных* цветов при различных параметрах размытия σ этих полос

Заключение

Количественные измерения играют в науке очень важную роль. Именно об этом писал У. Томсон (лорд Кельвин): «Если вы можете измерять и выражать в числах то, о чем говорите, то об этом предмете вы кое-что знаете; если же вы не можете сделать этого, то ваши познания скудны и

неудовлетворительны. Быть может, они представляют собой первый шаг исследования, но едва ли позволительно думать, что ваша мысль продвинулась до степени настоящего знания» [25].

В работе сделана попытка в рамках простой аналитической (т.е. «выраженной в числах») модели *количественно* аргументировать утверждение о том, что «цветной мир» поддается более точной и более быстрой сегментации, чем «серый мир». Это приводит к существенному облегчению условий возникновения жизненно необходимого эффекта высказывания, а также, вероятно, лежит в основе многих других когнитивных явлений, связанных с цветовым зрением.

Список литературы

1. Wolfe J.M. Guided Search 2.0: A revised model of visual search // *Psychonomic Bulletin and Review*. 1994. V. 1. P. 202–238.
2. Nakayama K., Silverman G.H. Serial and parallel processing of visual feature conjunctions // *Nature*. 1986. V. 320. P. 264–265.
3. Duncan J., Humphreys G.W. Visual search and stimulus similarity // *Psychol. Review*. 1989. Vol. 96. P. 433–458.
4. Bergen J.R., Julesz B. Parallel versus serial processing in rapid pattern discrimination // *Nature*. 1983. V. 303. P. 696–698.
5. Treisman A.M., Gelade G. A feature integration theory of attention // *Cognitive Psychology*. 1980. V. 12. P. 97–136.
6. Schneider W., Shiffrin R.M. Controlled and automatic human information processing: 1. Detection, search and attention // *Psychol. Review*. 1977. Vol. 84. P. 1–66.
7. Duncan J., Humphreys G.W. Visual search and stimulus similarity // *Psychol. Review*. 1989. Vol. 96. P. 433–458.
8. Quinlan P. T. Visual feature integration theory: past, present, and future // *Psychol. Bull.* 2003. Vol. 129. N 5 (Sep.). P. 643–673.
9. Treisman A. Search, similarity, and integration of features between and within dimensions // *J. Exp. Psychol.: Human Perception and Performance*. 1991. Vol. 17. N 3. P. 652–676.)
10. (Avraham T, Yeshurun Y., Lindenbaum M. Predicting visual search performance by quantifying stimuli similarities // *J. of Vision*. 2008. Vol. 8. N 4. P. 1–22.)
11. L.T. Hatfield, S.H. Douglas, N.W. Rohring, M. Kotler, M. Fikree, Patent US20100158379 A1 (2010).
12. Гонсалес Р., Вудс Р., Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005, 2006. 1072 с. R. Gonzalez, R. Woods, *Digital Image Processing*, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458 (2002).
13. Большой словарь иностранных слов. Издательство «ИДДК», 2007 <http://definithing.com/define-tech/background/>
14. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М. *Механика*. М.: Наука, 1988. 215 с.
L.D. Landau, E.M. Lifshitz. *Mechanics*. Vol. 1 (3rd ed.). Butterworth-Heinemann (1976).

15. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 3: Излучение. Волны. Кванты. М.: Мир, 1965.

R. Feinman, R. Leighton, M. Sands, The Feinmam Lectures on Physics, v.3, Addison Wesley Publ. Comp., Reading, MA, Palo Alto, London (1963).

16. Базаров И.П., Геворкян Э.В., Николаев П.Н., Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 310 с.

Onsager, L. Reciprocal Relations in Irreversible Processes. I. Phys. Rev. 1931, 37, 405–426.

17. Born M., Wolf E. Principles of Optics. Cambridge: Cambridge University Press (1999).

18. Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Черноризов А.М. Психофизиология цветового зрения. М.: Изд-во МГУ, 1989. 206 с.

T.T. Norton, D.A. Corliss, J.E. Bailey, Psychophysical Measurement of Visual Function, Richmond Products The Psychophysical Measurement of Visual Function, Butterworth-Heinemann, 2002.

19. Derrington A.M., Krauskopf J., Lennie P. Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque, J. Physiol. 357, 241–265 (1984).

20. D'Zmura, M., Knoblauch, K. (1998) Spectral bandwidths for the detection of color. Vision Research 38, 3117–3128.

21. Муравьева С.В., Пронин С.В., Шелепин Ю.Е. Контрастная чувствительность зрительной системы человека // Экспериментальная психология. 2010. Т. 3. No 3. С. 5–20.

22. Graham C.H. Color: data and theories, in: Vision and Visual Perception (C.H.Graham et. al., Eds). N. Y., 1965. P. 414–451.

23. Rovamo J.M., Kankaanpää M.I., Kukkonen H. Modelling spatial contrast sensitivity functions for chromatic and luminance-modulated gratings. Vision Research. Vol. 39. Issue 14. June 1999. P. 2387–2398.

24. Mullen, K.T. The contrast sensitivity of human colour vision to red – green and blue – yellow chromatic gratings // Journal of Physiology. (London). 1985. 359. P. 381–400.

25. Millikan R. Eelectrons (+ and -), Protons, Photons, Neutrons, and Cosmic Rays, U. Chicago Press, Chicago. 1935.

26. Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Черноризов А.М. Психофизиология цветового зрения. М.: Изд-во Московского университета, 1989.

З.С. ХАРЫБИНА

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону
har_zs@rambler.ru

**ВЛИЯНИЕ ГРАНИЦ ОКРУЖЕНИЯ
НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КЛЕТОК
МЕСТА В МОДЕЛИ НЕЙРОДИНАМИКИ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НАВИГАЦИИ,
ОСНОВАННОЙ НА СЕТЯХ С ЧЕТНЫМ
ЦИКЛИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ***

Рассматривается задача моделирования нейродинамики пространственного поведения возле границ окружения и в области, удаленной от них. Предложен алгоритм формирования последовательных полей места, основанный на взаимодействии информации, получаемой при интегрировании сигналов собственного движения и от границ окружения. Алгоритм предполагает, что вклад информации о границах наиболее существенен на периферии окружения и снижен в центральных областях.

Ключевые слова: *сети с четным циклическим торможением, клетки места, решетчатые клетки, граничные клетки.*

Введение

Представление о положении в пространстве у млекопитающих формируется благодаря активности «клеток места» (place cells), впервые обнаруженных в гиппокампе грызунов [см. 1]. Клетка места активна, когда животное находится в определенной области пространства, называемой «полем места». Вне поля места частота активности клетки близка к нулю.

Также в близлежащих структурах гиппокампа были обнаружены другие нейроны, обладающие локализованной в пространстве активностью: «решетчатые клетки» (grid cells), «граничные клетки» (border cells), «векторные граничные клетки» (vector boundary cells) и ряд других [см. 1].

На данный момент среди ученых нет единого мнения насчет взаимодействия между разными типами клеток гиппокампальной формации.

Многие математические модели кладут в основу активности клеток места ответы решетчатых клеток [2, 3]. Основные аргументы этих моде-

* Данная работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 16-31-00071 мол а.

лей связаны с тем, что главным неокортикальным входом к гиппокампу являются поверхностные слои медиальной энторинальной коры (МЭК) [4], где и были обнаружены решетчатые клетки. Кроме того, известно, что «перекартирование» полей места сопровождается сдвигами в пространственной фазе и/или ориентации решетчатых полей [5]. Эти модели сталкиваются с одной сложностью: стабильная активность клеток места у молодых крысят появляется раньше, чем стабильная активность решетчатых клеток [6].

Ряд авторов предлагает математические модели, кладущие в основу активности клеток места векторные клетки границы, обнаруженные в субикулуме [7]. Однако его проекции к гиппокампу ограничены [8]. Альтернативой являются граничные клетки энторинальной коры, однако их доля в МЭК мала [9]. Тем не менее, их должно быть достаточно, чтобы поддерживать активность клеток места у молодых крысят до формирования устойчивой активности решетчатых клеток (стабильная активность граничных клеток и клеток места возникают у крысят в одном возрасте [6]).

По этим причинам предполагается [6], что у взрослых особей граничные клетки могут вносить вклад в активность клеток места вблизи границ окружения, а клетки места с полями активности в центре должны сильнее полагаться на решетчатые клетки. Это предположение подтверждается тем, что у молодых крысят поля места в центре окружения менее стабильны, чем у границ [см. 6].

Ранее предлагалась модель нейродинамики навигационного поведения, основанная на сетях с четным циклическим торможением (ЕСИ-сетях) [10]. В ней в основу генерации полей места кладется суммация выходов от решетчатых клеток. Целью данной работы является расширение алгоритма формирования пространственных представлений клеток места с учетом информации о границах окружения.

Фазовое кодирование в ЕСИ-сети

ЕСИ-сеть состоит из осцилляторных модулей, объединенных слабыми реципрокными тормозными связями. Подробное описание сети приведено в [10–12].

В сети выделено две подсистемы осцилляторных модулей: информационная, на которую поступают импульсные входные воздействия, и референтная, используемая как система отсчета времени.

В математической модели используются параметры, при которых осцилляторные модули с низкой частотой, ассоциируемой с тета-ритмом, генерируют высокочастотные пачки осцилляций (гамма-пачки). В экспе-

риментах используются два типа входов: контекстный, общий для всех информационных модулей, и информационный, специфический для каждого модуля. Энергия входного импульса может приводить к сдвигу фазы информационного модуля относительно референтного. Величина сдвига зависит от амплитуды, длительности и времени прихода импульса, а также от текущего состояния сети, определяемого контекстным входом. Таким образом, сеть осуществляет кодирование входных сигналов фазовыми отношениями. Зависимость сдвига времени генерации гамма-пачки информационных модулей, вызванного постоянным информационным входом, от контекстного входа представлена в виде кривых фазовых ответов (рис. 1, А-В). Подробнее механизм фазового кодирования в ЕСІ –сети описан в [10–12].

Представление границ в ЕСІ-сети

Характерным свойством кривых фазовых ответов информационных модулей ЕСІ-сети является формирование трех ступеней локальной фазовой когерентности [10]: на определенных участках контекстного входа относительная фаза информационных модулей остается постоянной. Кроме того, фаза информационных модулей, составляющих один ансамбль, совпадает на этих участках, что демонстрирует их одновременную активацию. Эти ступени являются аттракторными состояниями сети, и, как было показано ранее, соответствуют полям активности решетчатых клеток [10]. Алгоритм трансформации фазы в этих областях в решетчатые поля подробнее описан в [13].

Максимальный фазовый сдвиг информационных модулей достигается при больших значениях амплитуды контекстного входа в правой части кривых фазовых ответов (см. рис. 1, А). Вычислительные эксперименты показывают, что при дальнейшем увеличении контекстного входа фаза информационных модулей не изменяется (см. рис. 1, Б). Важно, что в данной области фаза информационных модулей перестает зависеть от амплитуды не только контекстного входа, но и информационного. Единственным параметром, определяющим сдвиг информационных модулей относительно референтных, является время прихода информационного сигнала. Так в эксперименте 3k2fexp2017-3.net, результаты которого приведены на рис. 1, В, сигнал поступал на часть информационных модулей на отрезке времени [351–354], на другие – на отрезке [355–358]. Третья ступень фазовой когерентности в последнем случае располагается выше, т.е. сдвиг относительно референтных модулей больше.

Ранее был приведен алгоритм, позволяющий получить последователь-

ные поля активности клеток места в полярной системе координат на основе взвешенной суммы ответов информационных модулей ЕСИ-сети [10]. Согласно этому алгоритму, фаза активности информационных модулей относительно референтных определяет угловую координату текущего поля места. Радиус определяется амплитудой контекстного входа.

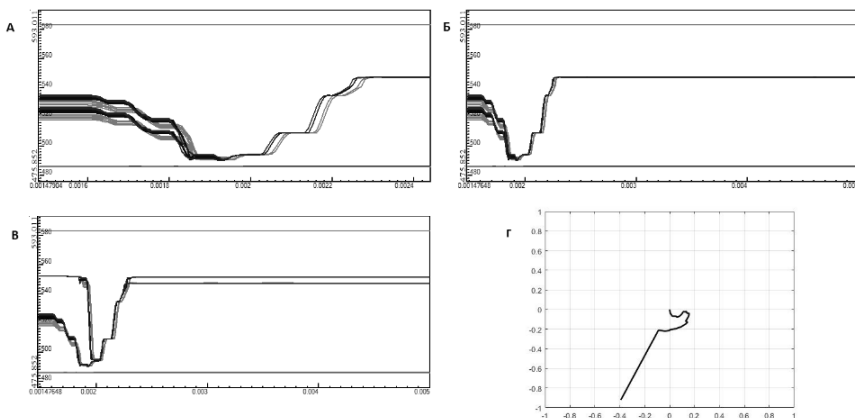


Рис. 1. А-В. Кривые фазовых ответов информационных модулей 3-слойной ЕСИ-сети. Информационным модулям разных слоев сети соответствуют разные оттенки серого цвета. По горизонтали: амплитуда контекстного входа. По вертикали: время генерации гамма-пачки. Горизонтальные линии соответствуют активности референтных модулей. А. Диапазон значений амплитуды контекстного входа $[0,00148-0,00245]$. Время подачи информационного входа для всех информационных модулей $[351-354]$. Эксперимент 3k2fexp2017.nex. Б. Диапазон значений амплитуды контекстного входа $[0,00148-0,005]$. Время подачи информационного входа для всех информационных модулей $[351-354]$. Эксперимент 3k2fexp2017-2.nex. В. Диапазон значений амплитуды контекстного входа $[0,00148-0,005]$. Время подачи информационного входа $[351-354]$ и $[355-358]$. Эксперимент 3k2fexp2017-3.nex. Г. Эгоцентрическое пространственное представление отдельного информационного модуля ЕСИ-сети в нормированном физическом пространстве. Начальное положение навигатора соответствует точке с координатами $(0, 0)$. Эксперимент 3k2fexp2017-2.nex

Рассмотрим пространственное представление, полученное на основе ответа только одного информационного модуля. В данном случае, третья ступень локальной фазовой когерентности кривой фазовых ответов данного модуля в пространственном представлении отображается в прямую линию (см. рис. 1, Г), идущую под постоянным углом от центра координат

нат. Поскольку фаза, определяющая угол наклона прямой, не изменяется при дальнейшем увеличении контекстного входа, пространственное представление информационного модуля ограничено этой прямой.

Феномен ограниченности пространственных представлений позволяет моделировать границы окружения без учета их природы (стена или обрыв), что соответствует экспериментально обнаруженным свойствам граничных клеток [см. 1].

Алгоритм построения пространственных представлений клеток места в полярной системе координат

Обнаруженные нейродинамические корреляты границ, как и корреляты решетчатой активности, показанные ранее [10, 13], справедливы для всех информационных модулей ЕСИ-сети. Однако только информационные модули, входящие в центральный ансамбль, равноудаленные от осей симметрии сети, не обладают дирекциональной чувствительностью [11]. По этой причине этот ансамбль выделен в отдельный кластер, кодирующий информацию о границах окружения (рис. 2).

Модифицированный алгоритм вычисления полярных координат (r_n , φ_n) на n -м шаге для получения пространственных представлений клеток места с учетом активности и решетчатых клеток, и клеток границы, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \varphi_n = \pi \left(\frac{\sum_{i=1}^k a_i (t_{in} - t_{rn}) + \sum_{j=1}^m b_j (t_{jn} - t_{rn})}{T_n (\sum_{i=1}^k a_i + \sum_{j=1}^m b_j)} \right); \\ r_n = \frac{S_n - S_0}{S_N - S_0}, \end{cases}$$

где a_i – вес информационного модуля, относящегося к CW и CCW-кластерам; b_j – вес информационного модуля, относящегося к центральному кластеру; t_{in} , t_{jn} – время генерации гамма-пачки информационных модулей CW/CCW-кластеров и центрального кластера, соответственно; t_{rn} – время генерации гамма-пачки референтных модулей; k , m – число информационных модулей CW/CCW-кластеров и центрального кластера, соответственно; T_n – период референтного тета-цикла; N – число вычислительных точек; S_n – амплитуда контекстного входа на n -том шаге; S_0 – начальное значение амплитуды контекстного входа; S_N – конечное значение амплитуды контекстного входа.

Весы информационных модулей, относящихся к CW-кластеру, положительные, к CCW-кластеру – отрицательные. Аналогично, знак веса информационных модулей центрального кластера определяется положением границы пространственных представлений: на условном севере положительные веса, на условном юге отрицательные.

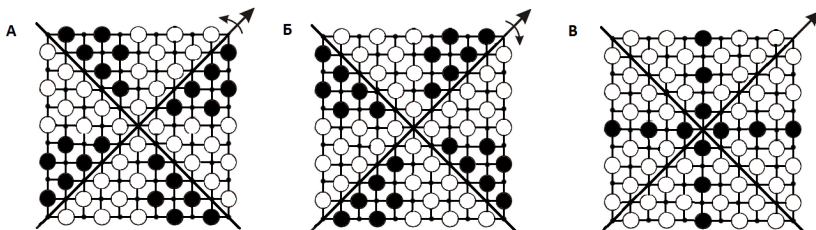


Рис. 2. Кластеры пятислойной ЕСИ-сети (выделены черным цветом). А. Кластер информационных модулей, кодирующих движение против часовой стрелки (CCW-кластер). Б. Кластер информационных модулей, кодирующих движение по часовой стрелке (CW-кластер). В. Кластер информационных модулей, кодирующих информацию о границах окружения

Моделирование движения навигатора возле границы и на удалении от нее

Как и в [6], в работе предполагается, что влияние границ на активность клеток места на периферии должно быть сильнее, чем в центре окружения. В модели этот эффект достигается настройкой весов ответов информационных модулей отдельных кластеров. Пусть центральные информационные модули, расположенные вертикально, определяют положение границы на условном юге (отрицательный вес b_j), а центральные информационные модули, расположенные горизонтально, определяют положение границы на условном севере (положительный вес b_j). На рис. 3 приведены результаты моделирования движения навигатора возле границы (большое значение весов b_j) и на удалении от нее (большое значение весов a_i).

При увеличении весов информационных модулей, кодирующих информацию о границе, пространственное представление смещается в соответствующем направлении. Увеличение весов информационных модулей CW и CCW-кластеров приводит к смещению пространственного представления к центру. Так, верхний ряд на рис. 3, Г соответствует пространственному представлению, представляющему собой поля последовательно активируемых клеток места, вблизи условной северной границы (слева), в центре окружения на отдалении от границ (в центре) и вблизи условной южной границы (справа).

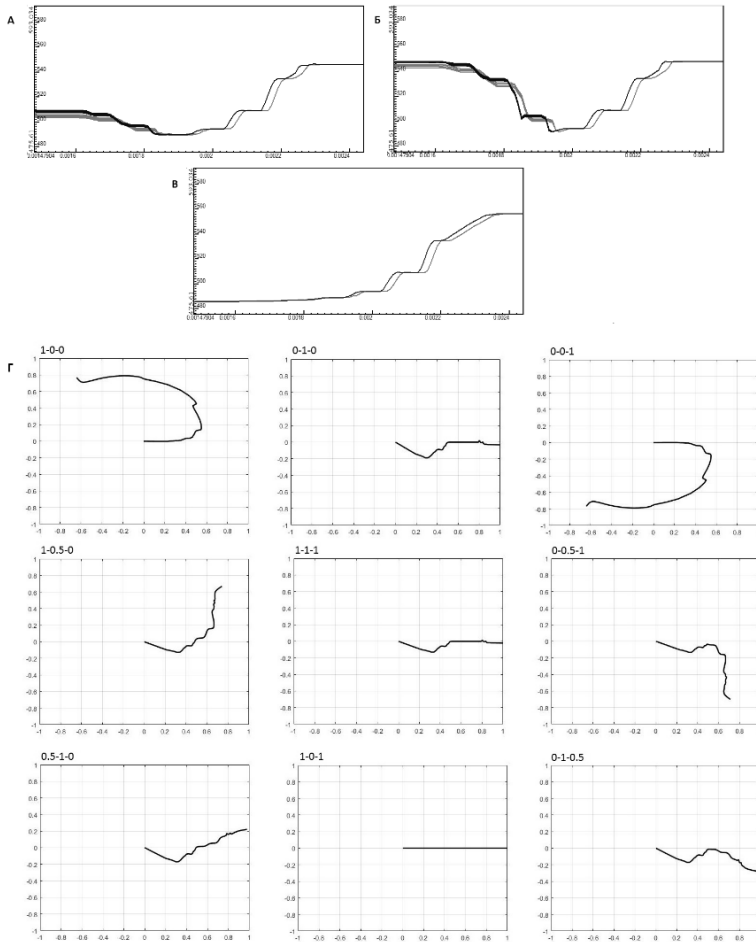


Рис. 3. Кривые фазовых ответов информационных модулей, входящих в SW-кластер (А), CCW-кластер (Б), кластер информационных модулей, кодирующих информацию о границах окружения (В). По осям: см. подпись к рис. 1 А–В. Г. Взвешенное эгоцентрическое пространственное представление информационных модулей ЕСИ-сети в нормированном физическом пространстве. Начальное положение навигатора соответствует точке с координатами (0, 0). Цифры над графиками представляют собой значение весов для информационных модулей, представляющих условную северную границу, SW/ CCW-модулей (общее значение) и модулей, представляющих условную южную границу, соответственно. Эксперимент 3k2fexp2017-4.nex

Одновременное увеличение весов информационных модулей, кодирующих информацию о противоположных границах, приводит к выпрямлению пространственного представления (рис. 3, Г, второй и третий ряд посередине). Действительно, большие веса центральных информационных модулей отражают близость обеих противоположных границ, что возможно только в узком окружении, таком как, к примеру, проход лабиринта, где последовательные поля места располагаются вдоль прямой.

Выводы

Необходимость сочетания разных сенсорных модальностей для успешной навигации подчеркивается во многих работах [14, 15]. В связи с этим был доработан алгоритм построения пространственных представлений клеток места в ЕСИ-сети. В основе алгоритма лежит взвешенное суммирование ответов решетчатых клеток, дополненное информацией о границах окружения. Важно, что представление границ в ЕСИ-сети не зависит от природы границ, что соответствует свойствам граничных клеток (см. [1]).

В модели предполагается, что вклад границ увеличивается на периферии окружения и уменьшается в центре. Полученные пространственные представления для разных соотношений весов a_i/b_j показывают, что информация о границе влияет на пространственные представления клеток места. Увеличение значений весов информационных модулей, кодирующих информацию о границе, приводит к сдвигу пространственных представлений в направлении соответствующей границы. В случае больших значений весов всех информационных модулей центрального кластера, означающих близкое расположение противоположных границ, наблюдается выпрямление пространственных представлений, что соответствует движению в узком пространстве.

Список литературы

1. Barry C., Burgess N. Neural mechanisms of self-location // *Current Biology*. 2014. V. 24. No 8. P. R330–R339.
2. O'Keefe J., Burgess N. Dual phase and rate coding in hippocampal place cells: theoretical significance and relationship to entorhinal grid cells // *Hippocampus*. 2005. V. 15. P. 853–866.
3. Fuhs M.C., Touretzky D.S. A spin glass model of path integration in rat medial entorhinal cortex // *The Journal of Neuroscience*. 2006. V. 26. P. 4266–4276.
4. Amaral D., Lavenex P. Hippocampal Neuroanatomy. In *The Hippocampus Book*. Ed.: Andersen P., Morris R., Amaral D., Bliss T., O'Keefe J. Oxford University Press. 2007. P. 37–114.

5. Fyhn M., Hafting T., Treves A., Moser M.-B., Moser E.I. Hippocampal re-mapping and grid realignment in entorhinal cortex // *Nature*. 2007. V. 446. № 8. P. 190–194.
6. Bjerknes T.L., Moser E.I., Moser M.-B. Representation of the geometric borders in the developing rat // *Neuron*. 2014. V. 82. P. 71–78.
7. Barry C., Lever C., Hayman R., Hartley T., Burton S., O’Keefe J., Jeffery K., Burgess N. The boundary vector cell model of place cell firing and spatial memory // *Reviews in the Neurosciences*. 2006. V. 17. P. 71–97.
8. Witter M.P., Amaral D.G. Hippocampal formation. In *The Rat Nervous System*. Third Edition. Ed.: Paxinos G. San Diego. Elsevier Academic Press. 2004. P. 635–704.
9. Solstad T., Boccara C.N., Kropff E., Moser M.B., Moser E.I. Representation of geometric borders in the entorhinal cortex // *Science*. 2008. V. 322. P. 1865–1868.
10. Цукерман В.Д., Харьбина З.С., Кулаков С.В. Математическая модель гиппокампального пространственного кодирования. II. Нейродинамические корреляты ментальных траекторий и проблема принятия решения // *Математическая биология и биоинформатика*. 2014. Т. 9. № 1. С. 216–256.
11. Цукерман В.Д., Еременко З.С., Каримова О.В., Кулаков С.В., Сазыкин А.А. Математическая модель гиппокампального пространственного кодирования. I. Нейродинамика решетчатых клеток // *Математическая биология и биоинформатика*. 2012. Т. 7. № 1. С. 206–243.
12. Цукерман В.Д. Нелинейная динамика сенсорного восприятия, или Что и как кодирует мозг. Ростов н/Д: Издательство Ростовского госуниверситета. 2005. 195 с.
13. Харьбина З.С. Построение карт активности решетчатых клеток энторинальной коры разного масштаба и ориентации решеток // *Нейроинформатика-2016*. XVIII Международная научно-техническая конференция. Сборник научных трудов. Ч. 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 275–283.
14. Save E., Hok V., Renaudineau S., Parron C., Poucet B. Cue and goal encoding in rodents: a source of inspiration for robotics? In *Robotics and cognitive approaches to spatial mapping*. STAR. Ed.: Jefferies M.E., Yeap W.-K. Berlin. Heidelberg. Springer-Verlag. 2008. V. 38. P. 163–180.
15. Save E., Poucet B. Involvement of the hippocampus and associative parietal cortex in the use of proximal and distal landmarks for navigation // *Behavioral Brain Research*. 2000. V. 109. P. 195–206.

**С.А. ПОЛЕВАЯ^{1,2}, Т.В. ЧЕРНИГОВСКАЯ³, И.С. ПАРИНА⁴,
А.А. КОНИНА³, С.А. АЛЕКСЕЕВА³, В.А. ДЕМАРЕВА²,
М.А. КНАБЕНГОФ³, С.Б. ПАРИН^{2,1}**

¹Нижегородская государственная медицинская академия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³Санкт-Петербургский государственный университет

⁴Нижегородский государственный лингвистический университет

им. Н.А. Добролюбова

s453383@mail.ru

ДИНАМИКА РИТМА СЕРДЦА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБРАЗОВ В ПРОЦЕССЕ СИНХРОННОГО ПЕРЕВОДА И В ТЕСТЕ СТРУПА*

С помощью технологии событийно-связанной телеметрии (ССТ) ритма сердца исследованы особенности вегетативного обеспечения рекордной по энергозатратности и стрессогенности деятельности – синхронного перевода (СП). Через сопоставление процессов взаимодействия информационных образов при СП и решении билингвального теста Струпа – лабораторной модели конфликта информационных образов различной природы – анализируются возможные физиологические механизмы решения когнитивных задач повышенной сложности.

Ключевые слова: *синхронный перевод, событийно-связанная телеметрия, тест Струпа, когнитивный конфликт, информационные образы.*

Введение

Упоминание о чрезвычайной энергетической расточительности нашей центральной нервной системы стало уже банальностью: сегодня всем известно, что наш мозг, по массе не превышающий 2–3 % от общей массы тела, потребляет более 30 % всей энергии нашего организма. Очевидно, что значительная часть этой энергии тратится на постоянное управление внутренними органами, как правило, не требующее вмешательства нашего сознания. Энергозатратным является и управление нашим поведением, независимо от того, является ли оно осознанным или представляет собой набор стереотипных действий. Особенно безрассудно транжируется энер-

* Данная работа выполнена при частичной поддержке РГНФ, грант № 15-06-10894 а, и РФФИ, грант № 16-06-00501 а.

гия при такой неспецифической реакции как стресс, когда на защиту от возможного повреждения бросаются все ресурсы организма [1, 2].

Особняком стоит вопрос о когнитивных нагрузках. Насколько энергозатратным является то, что принято называть «умственной деятельностью»? На что тратится энергия в этом случае? Какова «энергетическая цена» мысли, которую великий И.М. Сеченов назвал «незавершенным рефлексом»? Можно ли измерить эту «цену» хотя бы косвенно?

Вполне отдавая себе отчет в бесконечности процесса познания в данном конкретном случае, авторы данной работы поставили себе задачу попытаться найти путь к ответам хотя бы на часть из этих вопросов, проведя систематическое исследование профессиональной деятельности переводчиков-синхронистов – по всеобщему мнению (включая самих синхронистов), одного из самых изнуряющих видов когнитивной деятельности [3].

Постановка задачи

Главная задача исследования заключалась в попытке выяснения возможных психофизиологических механизмов, связанных с избыточной когнитивной сложностью синхронного перевода. Очевидно, что переводчик-синхронист, наряду со свободным владением двумя, как минимум, языками, должен обладать еще рядом качеств: в частности, уметь адаптироваться к темпу переводимой речи и обеспечивать оптимальное взаимодействие нескольких информационных образов. Последнее особенно значимо, если принять, что информационный образ представляет собой отображение событий и объектов в пространстве признаков [4]. Тогда очевидно, что при любом переводе, а особенно – синхронном, количество взаимодействующих информационных образов будет заведомо больше, чем при повторе текста.

И та, и другая задача требуют значительных энергозатрат, оценить которые возможно по показателям вегетативной регуляции (в том числе, ритма сердца [5–7]). Можно, таким образом, ожидать, что оценив различия в степени напряжения вегетативной регуляции при выполнении различных профессиональных заданий, мы сможем сопоставить их, по крайней мере, с тремя базовыми факторами, определяющими суммарную сложность (и, соответственно, энергозатратность) синхронного перевода для испытуемого: а) уровнем зрелости функциональной системы, определяющей владение родным или чужим языком; б) способностью поддерживать и выдерживать темп речи выступающего; в) оптимизацией архитектуры взаимодействия информационных образов под конкретную задачу (повтор – перевод, родной язык – иностранный язык).

Материал и методы исследования

В работе использована информационная технология событийно-связанной телеметрии (ССТ) ритма сердца [8]. Для исследования когнитивных функций применялась разработанная нами WEB-платформа ArWay.ru [9], обеспечивающая универсальную инфраструктуру для конструирования и проведения различных психофизиологических тестов (рис. 1).

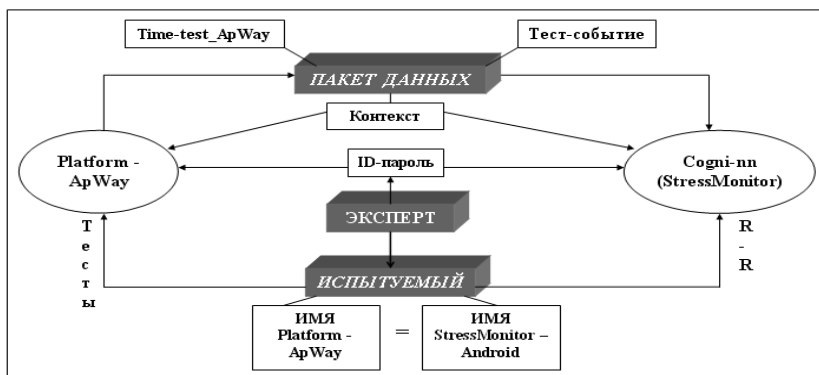


Рис. 1. Принципиальная схема программно-аппаратного комплекса для событийно-связанной телеметрии (ССТ) ритма сердца

Дизайн базовых экспериментов был сформирован таким образом, чтобы максимально приблизить обстановку во время измерения к контексту реальной работы синхронного переводчика (рис. 2).

Переводчики, последовательно сменяя друг друга, выполняли профессиональные задания: эхо-повтор текста на русском языке, синхронный перевод текста с иностранного на русский, эхо-повтор текста на иностранном языке, синхронный перевод текста с иностранного на русский. Кроме того, до и после профессиональной деятельности переводчики проходили на платформе ArWay проективный тест на уровень эмоциональной дезадаптации (УЭД), тест сенсомоторной активности и тест Струпа (10 испытуемых – русскоязычный вариант, 6 – билингвальный) [10–12]. В течение всего эксперимента проводилась телеметрическая регистрация кардиоинтервалограммы для выявления особенностей вегетативного и энергетического обеспечения всех видов деятельности переводчиков и определения уровня стрессогенности этой деятельности [13]. Для статистического анализа применялись следующие методы: ANOVA (метод повторных измерений) и корреляционный анализ.

ПЕРВЫЙ ИСПЫТУЕМЫЙ	ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ				ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПЕРЕВОДЧИКА - СИНХРОНИСТА								ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ			
	ТСР	ТСИ	СМА	УЭД	ЭИ	ПЗ	СРИ	ПЗ	ЭР	ПЗ	СИР	ПЗ	УЭД	ТСР	ТСИ	СМА
	ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА РИТМА СЕРДЦА															
НЕПРЕРЫВНАЯ АУДИОЗАПИСЬ																
t																
ВТОРОЙ ИСПЫТУЕМЫЙ	ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА РИТМА СЕРДЦА															
	ТСР	ТСИ	СМА	УЭД	ПЗ	ЭИ	ПЗ	СРИ	ПЗ	ЭР	ПЗ	СИР	УЭД	ТСР	ТСИ	СМА
	ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ				ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПЕРЕВОДЧИКА - СИНХРОНИСТА								ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ			

Рис. 2. Дизайн эксперимента по измерению психофизиологических показателей переводчиков-синхронистов в процессе моделирования их профессиональной деятельности. Аббревиатуры: ТСР – тест Струпа (русский вариант), ТСИ – тест Струпа (иностранный вариант), СМА – тест сенсомоторной активности, УЭД – уровень эмоциональной дезадаптации, ЭИ – эхо-повтор иностранного текста, ПЗ – пауза в работе, СРИ – синхронный перевод с родного языка на иностранный, ЭР – эхо-повтор текста на родном языке, СИР – синхронный перевод с иностранного языка на родной

В экспериментах приняли участие 16 переводчиков-синхронистов (13 женщин и 3 мужчин, возраст от 21 до 28 лет), прошедших специальное обучение данному роду деятельности.

Результаты исследования и их обсуждение

Мониторинг вариабельности RR-интервалов в процессе экспериментального моделирования профессиональной деятельности переводчика-синхрониста (рис. 3) полностью подтвердил распространенное мнение о высокой степени ее стрессогенности. Это проявлялось и в характерном уменьшении нативных RR-интервалов, и в соответствующих изменениях параметров вегетативной регуляции: падению общей мощности спектра вариабельности сердечного ритма на фоне резкого возрастания доминирования симпатической активности над парасимпатической.

Статистический анализ результатов мониторинга кардиоритма позволил выявить наименее (эхо-повтор текста на родном языке) и наиболее (синхронный перевод, в особенности с иностранного на родной язык) стрессогенные виды деятельности синхронистов (рис. 4).

Меньшее напряжение энергетических ресурсов предсказуемо проявилось при работе с русским языком (рис. 5). Определенным сюрпризом стал результат анализа динамики изменений RR-интервалов в зависимости от рода заданий (рис. 6): напряжение при синхронном переводе было статистически значимо выше (по сравнению с эхо-повтором) только в первые 100 с выполнения задания, а затем различия становились недостоверными.

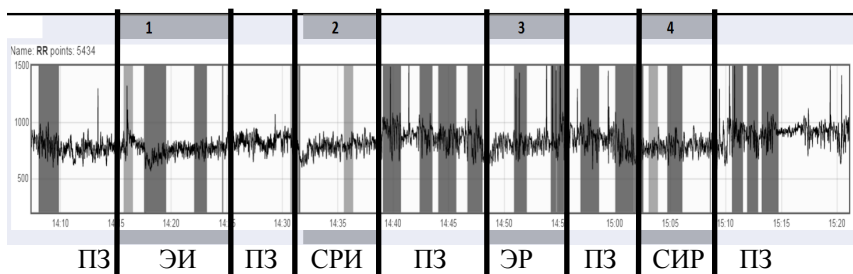


Рис. 3. Типичный пример записи кардиоинтервалограммы испытуемого во время выполнения двух эхо-повторов (1 – на немецком, 3 – на русском языке) и двух синхронных переводов (2 – с русского языка на немецкий, 4 – с немецкого языка на русский). Аббревиатуры те же, что и на рис. 2

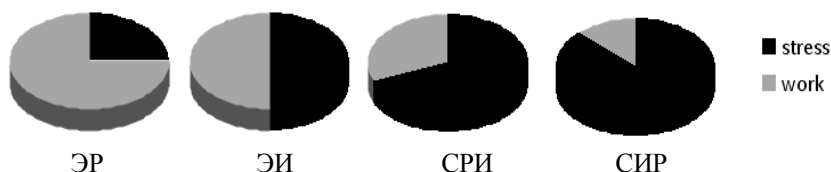


Рис. 4. Соотношение времени нормального функционального состояния и периодов стресса при выполнении синхронистами ($n = 16$) профессиональных заданий ($n = 64$). Аббревиатуры те же, что и на рис. 2

Таким образом, фактор зрелости функциональной системы, определяющей владение родным или чужим языком, с очевидностью проявился в сравнении энергозатрат при работе с родным и иностранным языком. Для выяснения роли фактора времени (способность поддерживать и выдерживать темп речи выступающего) были проанализированы результаты теста на простую сенсомоторную активность (рис. 7). При увеличении межстимульных интервалов (от 600 до 5000 мс) значимо увеличивается время реакции (см. рис. 7, А) и RR-интервалы (см. рис. 7, Б), что свидетельствует о закономерном снижении энергозатрат по мере снижения темпа предъявления стимулов (см. рис. 7, В).

Наибольший интерес представляет третий фактор: характер и степень сложности взаимодействия информационных образов при решении различных профессиональных задач в синхронном переводе.

На наш взгляд, удовлетворительной экспериментальной моделью для этого является компьютеризированный тест Струпа, позволяющий воспроизводить как взаимное усиление информационных образов благодаря

консолидации (физиологический аналог – облегчение в нейрональных модулях), так и их конкуренцию (в нейронных сетях – окклюзия [14]).

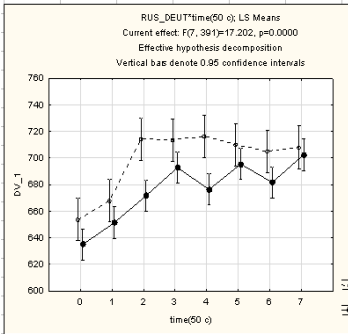


Рис. 5. Изменения RR-интервалов в процессе выполнения профессиональных заданий у синхронистов на русском (пунктир) и иностранном (сплошные линии) языке. По оси X – время (1 у.е. = 50 с); по оси Y – средний RR-интервал в мс; $n = 16$

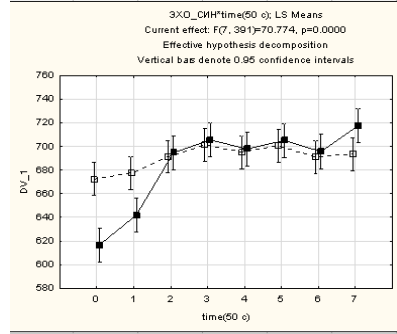


Рис. 6. Изменения RR-интервалов в процессе выполнения эхо-повтора (пунктир) и при синхронном переводе (сплошные линии), независимо от языка. По оси X – время (1 у.е. = 50 с); по оси Y – средний RR-интервал в мс; $n = 16$

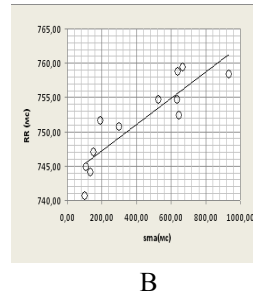
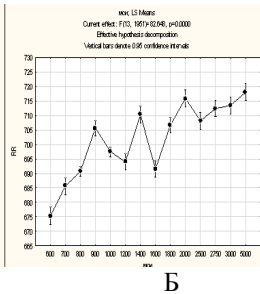
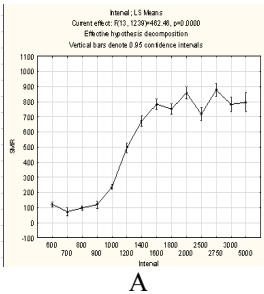


Рис. 7. Связь между временем реакции и ритмом сердца в задаче на простую сенсомоторную активность:

А – динамика времени реакции при изменении межстимульного интервала в задаче на простую сенсомоторную активность;

Б – динамика RR-интервалов при изменении межстимульного интервала в задаче на простую сенсомоторную активность;

В – прямая корреляция между временем реакции и средним RR-интервалом при изменении межстимульного интервала

Персонифицированный анализ соотношения ритма сердца и времени реакции при разном взаимодействии информационных образов (консолидация – конкуренция) в билингвальном тесте Струпа для 6 участников исследования показал закономерное учащение ритма (и, соответственно, увеличение энергозатрат) при увеличении времени реакции испытуемых (рис. 8), что, естественно, подтвердилось и при корреляционном анализе (рис. 9). Была выявлена обратная корреляция между временем реакции и средним RR-интервалом при идентичности (цвет = смысл) и рассогласовании (цвет \neq смысл) вербального и цветового образов.

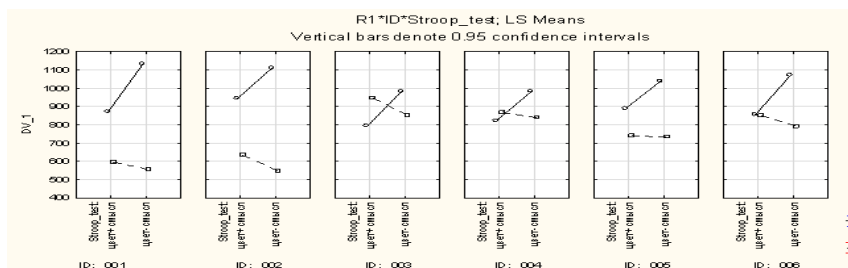


Рис. 8. Соотношение времени реакции (пунктир) и ритма сердца (сплошная линия) при выполнении билингвального теста Струпа ($n = 6$)

Детальный анализ соотношения времени реакции и уровня энергозатрат при выполнении переводчиками билингвального теста Струпа подтвердил значимость как фактора языковой компетентности, так и, что более важно, степени сложности взаимодействия информационных образов (рис. 10).

Совершенно закономерно, что выполнение синхронистами заданий в немецком варианте этого теста требовало и большего времени (см. рис. 10, А), и больших затрат энергии (см. рис. 10, Б). В то же время, наименьших затрат времени и наименьшего напряжения регуляторных систем требовали те задачи, в которых выбор цветового образца осуществлялся при идентичности смысла и цвета вербального стимула (консолидация = облегчение). Наиболее же затратными и по времени, и по энергии оказались задачи с выраженной конкуренцией цветового и смыслового образов (конфликт = окклюзия).

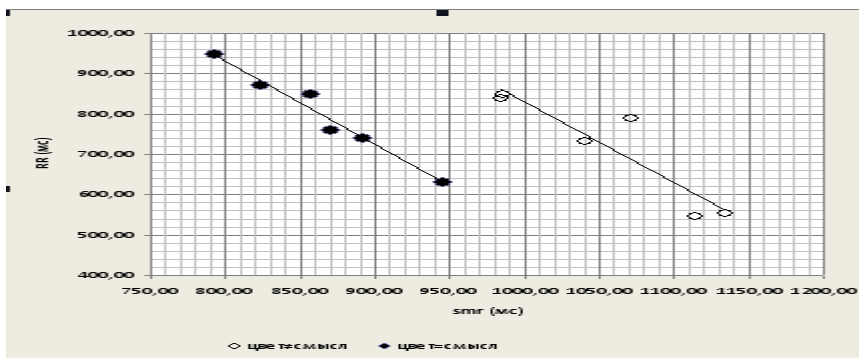


Рис. 9. Связь между временем реакции и ритмом сердца в тесте Струпа ($n = 6$)

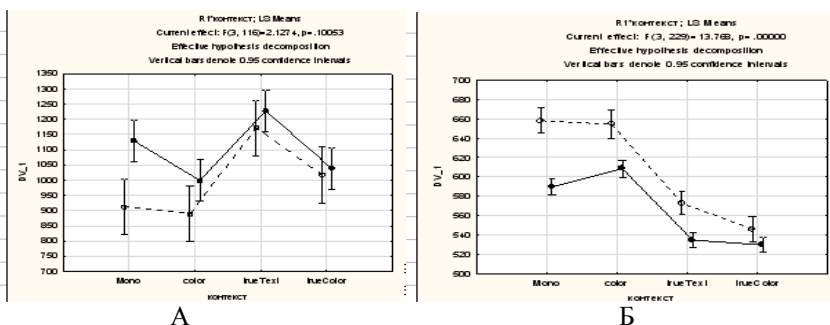


Рис. 10. Особенности энергообеспечения сенсомоторной активности при разном взаимодействии информационных образов в билингвальном тесте Струпа. По оси x – контекст: Mono – выбор цветового образца по смыслу слова в черно-белом варианте; color – выбор цветового образца при идентичности смысла и цвета вербального стимула; trueText – выбор цветового образца по смыслу слова при рассогласовании смысла и цвета букв; trueColor – выбор цветового образца по цвету букв при рассогласовании смысла и цвета букв.

А – среднее время реакции в разных контекстах теста Струпа;

Б – средний RR-интервал в разных контекстах теста Струпа.

Пунктир – русский вариант теста Струпа, сплошные линии – немецкий

Заключение

Таким образом, в нашем исследовании удалось проверить и частично подтвердить гипотезу трехфакторного психофизиологического механизма формирования высокой сложности синхронного перевода, основанную на

необходимости наличия у переводчика: высокого уровня зрелости функциональной системы, определяющей владение родным или чужим языком («компетентности»); умения соответствовать темпу речи выступающего; и оптимально выстроенной архитектуры взаимодействия информационных образов при решении задачи, требующей одновременной активации нейрональных модулей, вступающих не только в синергичные, но и в антагонистические взаимодействия (повтор – перевод, родной язык – иностранный язык). Выявлена сильная (0,87) корреляция межъязыковой разницы в средних RR-интервалах при переводе и при решении второй задачи Струпа (выбор цвета при условии, что в вербальном стимуле смысл = цвету букв): рост энергозатрат при переходе с русского на немецкий вариант теста Струпа позволяет предсказать, что данному синхронисту легче переводить с русского на немецкий, и наоборот. Можно предположить, что в процессе синхронного перевода у высококвалифицированных переводчиков режим взаимодействия информационных образов обеспечивается механизмом «облегчения» по аналогии со второй задачей Струпа (рис. 11).

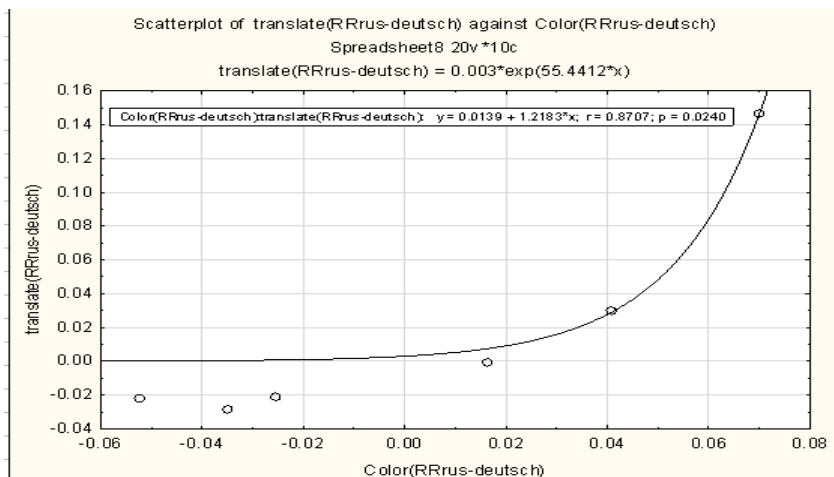


Рис. 11. Связь между межъязыковой разницей в средних RR-интервалах при переводе и при решении второй задачи Струпа (Color – вариант облегчения). По оси x – относительная разница средних RR-интервалов при переводе с разных языков; по оси y – разница средних RR-интервалов, связанных с решением второй задачи Струпа на разных языках

Список литературы

1. Парин С.Б. Люди и животные в экстремальных ситуациях: нейрохимические механизмы, эволюционный аспект // Вестник Новосибирского государственного университета. 2008. Т. 2. Вып. 2. С. 118–135.
2. Parin S.B., Bakhchina A.V., Polevaia S.A. A neurochemical framework of the theory of stress // International Journal of Psychophysiology. 2014. V. 94. Iss. 2. P. 230.
3. Chernigovskaya T.V., Parin S.B., Parina I.S., Konina A.A., Urikh D.K., Yachmonina Y.O., Chernova M.A., Polevaya S.A. Simultaneous interpreting and stress: pilot experiment // International Journal of Psychophysiology. 2016. V. 108. P. 165.
4. Полевая С.А., Еремин Е.В., Буланов Н.А., Шишалов И.С., Чернова М.А., Парин С.Б. Событийно-связанная телеметрия для детектирования имплицитного стресса в контекстах естественной деятельности // Процедуры и методы экспериментально-психологических исследований / Отв. ред. В.А. Барабанщиков. М.: Изд-во «Институт психологии РАН». 2016. С. 69–75.
5. Парин В.В., Баевский Р.М. Введение в медицинскую кибернетику. М.: Медицина, 1966. 295 с.
6. Черниговский В.Н. Интероцепция. Л.: Наука, 1985. 413 с.
7. Полевая С.А., Парин С.Б., Бахчина А.В., Некрасова М.М., Шишалов И.С., Рунова Е.В., Кожевников В.В. Система определения функционального состояния группы людей. Патент РФ на полезную модель № 129680, опубл. 27.06.2013.
8. Polevaia S.A., Parin S.B., Eremin E.V., Bulanov N.A., Chernova M.A., Parina I.S., Chikov M.B., Chernigovskaya T.V. Event-related telemetry (ERT) technology for study of cognitive functions // International Journal of Psychophysiology. 2016. V. 108. P. 87–88.
9. Полевая С.А., Парин С.Б., Еремин Е.В., Буланов Н.А., Чернова М.А. Разработка технологии событийно-связанной телеметрии для исследования когнитивных функций // XVIII Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика – 2016». Сборник научных трудов. Ч. 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 34–44.
10. Григорьева В.М., Тхостов А.Ш. Способ оценки эмоционального состояния человека. Патент РФ №2291720. С1. 2007.
11. Бахчина А.В., Серова М.С., Синеева Т.Н., Буланов Н.А., Полевая С.А. Билингвальный тест Струпа как способ отображения лингвистических функций мозга // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015. Труды IV Всероссийской конференции. Н. Новгород: Изд-во ИПФ РАН. 2015. С. 27–29.
12. Petukhov A.Y., Polevaya S.A. The bilingual Stroop test from the view of the Information Images Theory // Procedia Computer Science. 2016. V. 88. P. 415–422.
13. Parin S.B., Polevaia S.A., Gromov K.N., Polevaia A.V., Kovalchuk A.V. Short-term variability of R-R intervals during acute stress in healthy adults: neuromorphic model, experiment data, monitoring of daily life activity // International Journal of Psychophysiology. 2016. V. 108. P. 88.
14. Schmidt R.F., Thews G., Lang F. Physiologie des Menschen. Springer-Verlag. 2000.

**И.С. КНЯЗЕВА^{1,3}, Ю.А. БОЙЦОВА², Н.Г. МАКАРЕНКО¹,
С.Г. ДАНЬКО², А.О. ЕФИТОРОВ⁴, Д.А.ЗЕЛЕНКИНА³**

¹Главная (Пулковская обсерватория) РАН (ГАО РАН), Санкт-Петербург

²Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой Российской академии наук
(ИМЧ РАН), Санкт-Петербург

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

⁴НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова
iknyazeva@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗОВОЙ ВЕЙВЛЕТ КОГЕРЕНТНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ С РАЗНОЙ СТЕПЕНЬЮ ВЫРАЖЕННОСТИ МЕНТАЛЬНОГО И СЕНСОРНОГО ВНИМАНИЯ

Работа посвящена применению фазовой вейвлет когерентности для анализа мозговой активности в состояниях с разной степенью выраженности ментального и сенсорного внимания. При анализе электроэнцефалографических коррелят ментальных состояний основное внимание уделяется анализу спектральной мощности квазистационарной ЭЭГ или связанной с событиями мощности ЭЭГ (task-related power, time-frequency spectra). Анализ когерентности посвящено значительно меньшее количество работ. В результате настоящей работы показано, что анализ фазовой вейвлет когерентности позволяет получить дополнительную информацию об организации мозговой активности, которая обеспечивает состояния ментального внимания.

Ключевые слова: *вейвлет когерентность, анализ ЭЭГ, анализ нестационарных сигналов.*

Введение

Хотя в современной психофизиологии выделяют внимание чувственное и интеллектуальное, до последнего времени интеллектуальное (ментальное) внимание занимало очень скромное место в экспериментальных исследованиях. Причина этого в возможности экспериментального контроля внешних входов в ситуациях исследования внимания перцептивно и отсутствии такой возможности для внутренних входов (мыслей, знаний и воспоминаний) при исследованиях интеллектуального внимания. Однако, поиск методических подходов, которые позволили бы объективно исследовать деятельность мозга в таких трудных условиях, в последнее время активизировался.

Если рассматривать электроэнцефалографические корреляты состояний с разной степенью выраженности ментального и сенсорного внимания, то основное внимание уделяется анализу спектральной мощности квазистационарной ЭЭГ (Ray, Cole 1985; Cooper et al., 2003; Данько 2006; Бойцова, Данько 2010 и др.), или анализу связанной с событиями спектральной мощности ЭЭГ – task-related power, time-frequency spectra (напр. Benedek et al., 2014, Bartsch et al., 2015). Несмотря на то, что в некоторых работах рассматривались и параметры когерентности ЭЭГ (von Stein et al., 2000; Данько, 2006; Бойцова, Данько, 2010), количество работ относительно анализа когерентности в ментальных состояниях все же сильно ограничено. Вместе с тем, параметры когерентности электрической активности мозга обычно рассматриваются как эффективный показатель процесса включенности разных зон мозга в реализацию когнитивных процессов (Ливанов, 1972, Свидерская 1987, Кирой, 1987 и мн. др.).

В современной литературе для исследований ментального внимания преимущественно используется схема исследования, позволяющая анализировать вызванную активность (Benedek et al, 2014, Bartsch et al, 2015). Поэтому применение метода анализа вайвлет фазовой когерентности, позволяющего проследить изменение связанности мозговых процессов во времени вдвойне актуально.

Ранее (Бойцова и др., 2017) состояния ментального внимания (продуктивное воображение – доминирование процессов творческого воображения и репродуктивное воображение – доминирование процессов воспоминания) исследовались нами как задаваемые инструкцией состояния, в которых испытуемые пребывали в течение 3–5 мин без поступления внешних сигналов. Полученные при этом результаты анализа квазистационарной ЭЭГ соответствовали литературным данным (Ray, Cole 1985, Klimesch et al., 2007) и нашим предыдущим результатам (Данько 2006, Бойцова, Данько 2010) о том, как спектральная мощность ЭЭГ связана с внешним и внутренним вниманием. В настоящей работе для исследования мозговой организации состояний ментального внимания (продуктивное и репродуктивное воображение) используется анализ вызванной активности ЭЭГ.

Схема эксперимента

В исследовании приняли участие 29 здоровых испытуемых (из них 19 женщин), все праворукие. Перед заданием на репродуктивное воображение (РВ) испытуемые заранее просматривали и запомнили цветные изображения и соответствующие им слова существительные (например: яблоко, пчела и т.д.). При выполнении задания РВ испытуемым последовательно

предъявляли слова и просили вспомнить и визуализировать на фоне белого экрана компьютера соответствующее изображение. В задании на продуктивное воображение (ПВ) испытуемым последовательно предъявляли сразу два слова существительных (яблоко, пчела) и, смотря на белый экран компьютера, просили придумать и визуализировать изображение-химеру, соответствующее одновременно двум словам (например: яблоко с крылышками пчелы). Когда испытуемым удавалось вспомнить или вообразить соответствующее изображение они нажимали на кнопку. Слова предъявлялись черными буквами на белом фоне. Задания ПВ и РВ предъявлялись блоками, в каждом блоке по 80 проб. Престимульный интервал – 300 мс, длительность первого стимула (слова) – 400 мс, длительность второго стимула, запускающего процессы воображения или вспоминания (белый экран) 5000 мс, длительность интервала между двумя стимулами в пробе – 800 мс.

Регистрация ЭЭГ производилась с помощью 19-канального компьютерного электроэнцефалографа «Мицар-202» производства ООО Мицар, (<http://www.mitsar-medical.com>) и электроэнцефалографической шапочки Electro-Cap (www.electro-cap.com) с 19 электродами, расположенным на поверхности головы в соответствии с системой 10–20 и референтными электродами на мочках ушей. Регистрация ЭЭГ осуществлялась в референтном монтаже, частота дискретизации – 500 Гц. Параметры ФВЧ и ФНЧ составляли соответственно 0,53 и 30 Гц, так же использовался режкторный фильтр – 45–55 Гц.

Метод независимых компонент (ICA) применялся для коррекции артефактов моргания, кардиограммы и движения глаз в записях ЭЭГ, для разложения на компоненты использовался алгоритм «Infomax». Дополнительно все ЭЭГ записи подвергались визуальному анализу, пробы в которых испытуемый не справился с заданием, либо двигался во время задания были помечены и исключены из рассмотрения. Рассматривались изменения параметров вейвлет когерентности ЭЭГ в частотных диапазонах тета (4,5–7,5 Гц), альфа1 (7,5–9,5 Гц), альфа2 (9,5–12,5 Гц), бета1 (12,5–18 Гц), бета2 (18–30 Гц).

Фазовая вейвлет когерентность. Описание алгоритма

Для вычисления фазовой вейвлет когерентности применялся алгоритм, адаптированный для анализа ЭЭГ данных, описанный в работе Cohen M, 2014. В качестве вейвлета использовался комплексный вейвлет Морле, который определяется как произведение комплексной синусоидальной волны и гауссианы:

$$\psi(f, t) = \frac{1}{(s\sqrt{\pi})^{1/2}} \exp\left(-\frac{t^2}{2s^2}\right) \exp(i2\pi ft).$$

От дисперсии гауссианы зависит количество циклов из которых состоит вейвлет, большее число циклов синусоиды позволяет лучше локализовать частоту сигнала, меньшее число обеспечивает лучшую локализацию во времени. Так как в нашем случае основная цель исследовать временные изменения, то параметр дисперсии в зависимости от частоты выбирался таким образом, чтобы вейвлет содержал от трех до четырех циклов.

Вейвлет преобразование, которое представляет собой свертку вейвлета и сигнала (ЭЭГ канала), вычислялось с помощью обратного преобразования Фурье от произведения Фурье образов сигнала и вейвлета.

Сигнал ЭЭГ представляет собой многомерный ряд (19 каналов). Длительность каждого задания или пробы около 7 с, или 3500 отсчетов. Все пробы были объединены в одну запись, количество успешных проб в эксперименте составляло от 45 до 80. Таким образом, каждый сигнал для одного канала представлял собой временной ряд длиной от 160 до 280 тысяч отсчетов. Для оптимизации вычислений вейвлет преобразование проводилось с использованием 15 частот в диапазоне от 4 до 30 Гц, который покрывает интересующий диапазон ритмов. Частоты располагались равномерно в логарифмической шкале, что обеспечивает равномерное представление всех ритмов.

Фазовая когерентность вычисляется как усредненная разность фаз между вейвлет преобразованиями двух электродов (Lachaux et al. 2000):

$$PC(t, f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp(i\varphi_x - i\varphi_y).$$

В данной работе проводилось усреднение по времени для каждой пары электродов и после этого для каждого момента времени усреднение по пробам или триалам. Размер окна, в котором проводилось усреднение, зависел от частоты и выбирался так, чтобы в окне содержалось от 3 циклов для нижней частоты тета ритма (4 Гц) до 6 циклов самого высокочастотного бета ритма (30 Гц). В литературе фазовую когерентность еще обозначают PLV (phase locking value). Итоговая формула для вычисления этой величины выглядит как:

$$PLV(t, f) = \frac{1}{N_{trial}} \sum_{trial=1}^{N_{trial}} PC(t, f).$$

Фазовая когерентность была вычислена для всех пар каналов (171 пара) для каждого испытуемого. После этого для группы испытуемых участвующих в эксперименте была вычислена Z статистика:

$$Z_{score}(t, f) = \frac{mean(PLV(t, f))}{std(PLV(t, f))}.$$

Все вычисления проводились в среде Python, код доступен в репозитории: https://github.com/fltor/EEG_Coherence

Результаты

Анализ фазовой вейвлет когерентности в рассматриваемых состояниях ментального внимания показал, что состояния ПВ и РВ во многом характеризуются сходными изменениями. Так в обоих состояниях отмечается увеличение вызванной когерентности в высокочастотных бета_{1,2} диапазонах между лобными и париетальными отделами коры. Полученные данные согласуются с литературными источниками, где усиление когерентности ЭЭГ между передними и задними областями коры преимущественно в высокочастотных диапазонах ЭЭГ связывается с состояниями направленного внимания (напр. Мачинский и др. 1990, Bressler et al., 1993, von Stein et al., 2000) при выполнении сенсорных и ментальных заданий.

Также в настоящей работе для обоих состояний ПВ и РВ показано увеличение вейвлет когерентности в низкочастотных тета и альфа₁ диапазонах в передних, лобных зонах коры. При этом увеличение когерентности в тета и альфа₁ диапазонах в лобных отделах более выражено для воспоминания (рис. 1).

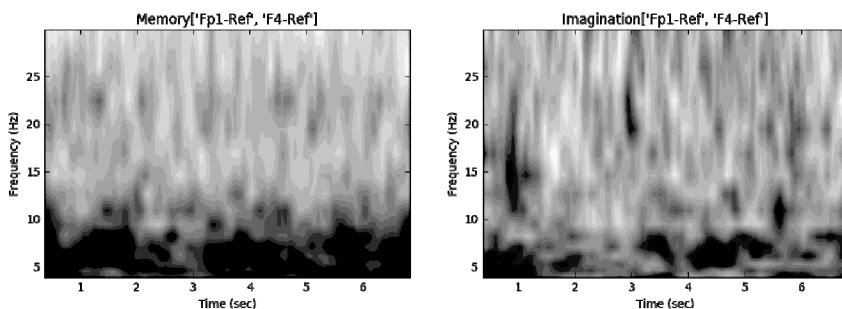


Рис. 1. Фазовая когерентность между лобными отделами (каналы Fp1–F4) для задания на репродуктивное воображение (Memory слева) и продуктивное воображение (Imagination справа)

Ранее, аналогичные результаты – большие значения когерентности в тета и альфа1 диапазонах преимущественно в передних отделах коры были показаны при переходе от внешне-ориентированного состояния покоя с ГО к более внутренне-ориентированному состоянию покоя при ГЗ (Данько 2006, Бойцова, Данько 2010). Пространственная синхронизация на частоте тета и альфа1 диапазонов ЭЭГ показана также во время извлечения информации из памяти и построения ментальных образов (von Stein et al., 2000), во время медитативных практик (Marzetti et al., 2014). Таким образом, обнаруженное увеличение когерентности может рассматриваться как отражение процесса интернализации внимания, концентрации внимания на обработке внутреннего ментального контекста в состояниях продуктивного и репродуктивного воображения.

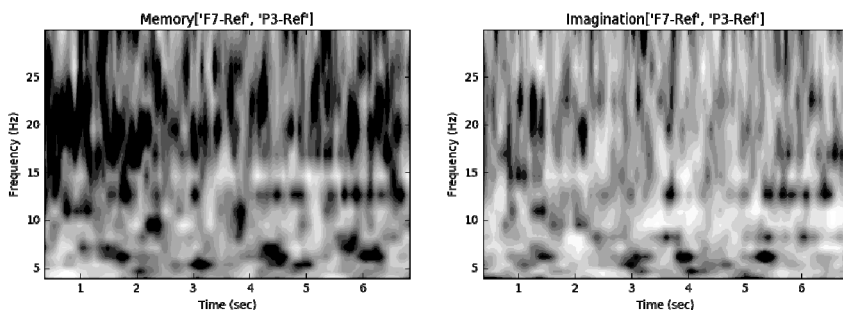


Рис. 2. Фазовая когерентность между лобными отделами (каналы F7–P3) для задания на репродуктивное воображение (Memory слева) и продуктивное воображение (Imagination справа)

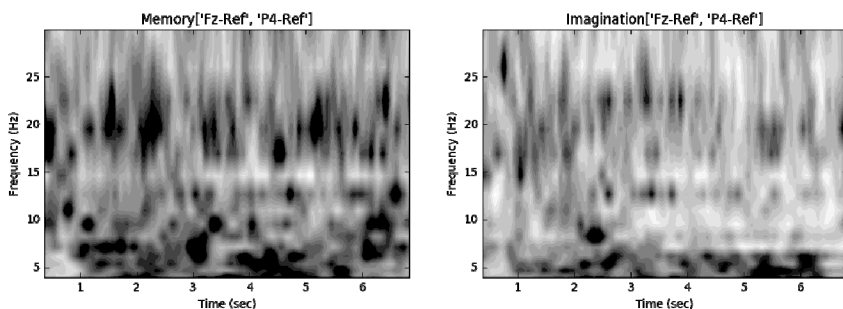


Рис. 3. Фазовая когерентность между лобными отделами (каналы Fz–P4) для задания на репродуктивное воображение (Memory слева) и продуктивное воображение (Imagination справа)

Наравне со сходствами выявлены определенные различия между состояниями ПВ и РВ. Так для репродуктивного воображения изменения когерентности более выражены, чем для продуктивного, творческого воображения. На рис. 2 и 3 представлены картины фазовой когерентности для лобных и парietальных отделов (каналы F7–P3, Fz–P4) Увеличение когерентности в бета1 и бета2 диапазонах между лобными и парietальными отделами, выражено больше для вспоминания (репродуктивное воображение).

Дело в том, что рассматриваемые состояния являются достаточно сходными с точки зрения психофизиологии. Оба состояния связаны с извлечением информации из памяти и с произвольным манипулированием ментальными репрезентациями (Baddeley, 1992, Moulton and Kosslyn, 2009). Но если основной тенденцией памяти является восстановление системы образов, максимально приближенной к ситуации, которая имела место в опыте, то воображение заключается в создании новых ментальных образов путём переработки ранее полученного материала (Немов, 2003). Возможно, вовлечение дополнительных когерентно работающих зон коры в реализацию состояния РВ (доминирование процессов вспоминания) связано с работой механизма сопоставления с оригиналом, что актуально именно при вспоминании, тогда как творческое воображение больше связано со свободным потоком ассоциаций. Полученные данные частично согласуются с литературными источниками, где также показано, что выполнение заданий на креативное воображение и воссоздающее воображение вызывает активацию разных когерентных сетей мозга (Kozhedub et al., 2006).

Список литературы

1. Ray W.J., Cole H.W. EEG activity during cognitive processing: influence of attentional factors // *Int. J. Psychophysiol.* 1985. V. 3. P. 43.
2. Cooper N.R., Croft R.J., Dominey S.J.J., Burgess A.P., Gruzelier J.H. Paradox lost? Exploring the role of alpha oscillations during externally vs. internally directed attention and the implications for idling and inhibition hypotheses // *Int. J. Psychophysiol.* 2003. V. 47. P. 65–74.
3. Данько С.Г. Об отражении различных аспектов активации мозга в электроэнцефалограмме: что показывает количественная электроэнцефалография состояний покоя с открытыми и закрытыми глазами // *Физиология человека.* 2006. Т. 32. № 4. С. 5–17.
4. Бойцова Ю.А., Данько С.Г. Изменения ЭЭГ при сравнении состояний покоя с открытыми и закрытыми глазами в условиях темноты // *Физиология человека.* 2010. Т. 36. № 3. С. 138–141.
5. Benedek M., Schickel R.J., Jauk E., Fink A., Neubauer A.C. Alpha power increases in right parietal cortex reflects focused internal attention // *Neuropsychologia.* 2014. V. 56. P. 393–400.

6. Bartsch F., Hamuni G., Miskovic V., Lang P.J., Keil A. Oscillatory brain activity in the alpha range is modulated by the content of word-prompted mental imagery // *Psychophysiology*. 2015. V. 52. P. 727–735.

7. Von Stein A., Sarnthein J. Different frequencies for different scales of cortical integration: from local gamma to long range alpha/theta synchronization // *Int. J. Psychophysiol.* 2000. V. 38(3). P. 301–313.

8. Ливанов М.Н. Пространственная организация процессов головного мозга. М.: Наука, 1972. 181 с.

9. Свидерская Н.Е. Синхронная электрическая активность мозга и психические процессы. М.: Наука, 1987. 155 с.

10. Кирой В.Н. Пространственно-временная организация электрической активности мозга человека в состоянии спокойного бодрствования и при решении мыслительных задач // *Журнал высшей нервной деятельности*. 1987. Т. 37. № 6. С. 1024–1033.

11. Бойцова Ю.А. Данько С.Г., Соловьева М.Л. Отражение состояний продуктивного и репродуктивного воображения в локальной синхронизации тета- и альфа-диапазонов ЭЭГ // *Физиология человека*. 2017. Т. 43. № 3. С. 132–136.

12. Klimesch W., Sauseng P., Hanslmayr S. EEG alpha oscillations: the inhibition-timing hypothesis // *Brain Res Rev.* 2007. V. 53. P. 63–88.

13. Cohen M.X. Analyzing neural time series data: theory and practice. // MIT Press, 2014.

14. Lachaux J. P. et al. Studying single-trials of phase synchronous activity in the brain // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2000. Т. 10. № 10. С. 2429–2439.

15. Мачинский Н.О., Мачинская Р.И., Труш В.Д. Электрофизиологическое исследование функциональной организации мозга человека при направленном внимании. Сообщение 1. Взрослые в норме // *Физиология человека*. 1990. Т. 16. № 2. С. 5–15.

16. Bressler S.L., Coppola R., Nakamura R. Episodic multiregional cortical coherence at multiple frequencies during visual task performance // *Nature*. 1993. V. 366. P. 153–156.

17. Marzetti L., Di Lanzo C., Zappasodi F., Federico Chella, Raffone A., Pizzella V. Magnetoencephalographic alpha band connectivity reveals differential default network interactions during focused attention and open monitoring meditation // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2014. V. 8. P. 1–11.

18. Baddeley A. Working Memory // *Science*. New Series. 1992. V. 255. № 5044. P. 556–559.

19. Moulton S.T. and Kosslyn S.M. Imagining predictions: mental imagery as mental emulation // *Phil. Trans. R. Soc. B*. 2009. V. 364. P. 1273–1280.

20. Немов П.С. Психология: Учеб. для студ. высш. пед. учеб. заведений: В 1 кн. 4-е изд. М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2003. 688 с.

21. Kozhedub R.G., Sviderskaia N.E., Taratynova G.V. Spatial organization of biopotentials and original features of visual images // *Zh Vyssh Nerv Deiat Im I P Pavlova*. 2006. V. 56(4). P. 437–446.

Н.Н. ФИЛАТОВА, К.В. СИДОРОВ, П.Д. ШЕМАЕВ

Тверской государственной технической университет
nfilatova99@mail.ru, bmisidorov@mail.ru, pshemaev@rambler.ru

МОНИТОРИНГ ХАРАКТЕРИСТИК АТТРАКТОРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА*

Рассмотрен подход к мониторингу эмоциональных реакций с использованием оценок характеристик ЭЭГ-сигналов. Описаны методика и результаты экспериментов, иллюстрирующих изменения свойств аттракторов в ходе воздействия на человека пачками акустических стимулов, имеющих одинаковую эмоциональную интерпретацию. На основе нечетких оценок знака приращений плотности аттракторов, реконструированных для нескольких последовательных окон наблюдения, определяется направление тренда эмоционального состояния.

Ключевые слова: *эмоциональное состояние, ЭЭГ, биотехническая система, аттрактор, нечеткие множества.*

Введение

Важным направлением прикладных исследований, на наш взгляд, является создание моделей и алгоритмов мониторинга эмоционального состояния пользователя автоматизированных систем [1–4]. Результаты мониторинга будут полезны:

- для оценки и прогнозирования работоспособности пользователя;
- для принятия решения с учетом направления развития эмоциональной реакции пользователя.

В предыдущих работах [5, 6] мы представили метод оценки эмоционального состояния оператора автоматизированной системы с помощью реконструкции аттракторов для паттернов речи или фрагментов записей электроэнцефалограммы (ЭЭГ). В частности, была экспериментально обоснована возможность оценки направления развития эмоциональной реакции человека с помощью нечеткой оценки приращения центральной плотности 2-х аттракторов, реконструированных по двум последовательным фрагментам записи речи или ЭЭГ-сигналов.

* Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-01-00742).

В представленном докладе мы излагаем результаты дальнейших исследований, связанных с изучением возможности анализа и количественной оценки тренда эмоционального состояния испытуемого путем пошаговой оценки свойств нескольких аттракторов, упорядоченных по времени. Анализ особенностей динамики характеристик аттракторов на разных интервалах наблюдения (в продолжении одного стимула; в продолжении нескольких стимулов одной модальности; в переходном процессе, вызванном сменой модальности стимула) позволил сформулировать основные положения алгоритма оценки направления тренда.

В докладе рассмотрены примеры работы алгоритма, которые подготовлены с использованием экспериментальных записей ЭЭГ-сигналов в ходе эмоциогенной стимуляции испытуемого акустическими (музыкальными и техногенными) стимулами.

Постановка задачи и методика исследования

Исходными данными для анализа и формулирования гипотез являются результаты экспериментов с многоканальной системой «EEG/S» (electroencephalogram / speech signal) [6, 7]. Система «EEG/S» позволяет регистрировать и распознавать даже слабые изменения эмоционального состояния человека в процессе восприятия акустических стимулов.

В качестве стимулов для вызова эмоциональной реакции использовались аудиозаписи продолжительностью от 1-й до 3-х минут. Эксперименты проводились в изолированном от посторонних звуков помещении. В процессе регистрации испытуемый находился в положении сидя. В качестве источников звука использовались внешние динамики, расположенные на расстоянии не более 1,5 метра до кресла испытуемого. Такая конфигурация позволяет исключить возникновение помех в ЭЭГ сигнале, появляющихся при использовании наушников.

Все предъявляемые стимулы можно разделить на 5 блоков в зависимости от модальности: «нейтральный», «грусть», «позитивный», «раздражитель», «страх». В общей сложности подготовлен набор из 35 аудиозаписей, содержащих, как звуки естественного (например, песни птиц, шум моря), так и искусственного (например, музыка, звук отбойного молотка, аварийная сирена) происхождения.

Ранжирование стимулов по степени соответствия модальности эмоции выполняли сами испытуемые в соответствии с собственными вкусами и предпочтениями. Оценка стимула по 10-ти бальной шкале осуществлялась дважды: заранее при подготовке к эксперименту, и повторно в ходе эксперимента после прослушивания стимулов. Интервал Δt_1 между запися-

ми одного блока варьировался от 5 до 15 секунд. Перерыв между блоками (Δt_2) устанавливался не менее 1 минуты, что позволяло корректировать (при необходимости) положения датчиков. Эксперимент проводился с участием физически здоровых людей в возрасте от 22-х до 24-х лет. После предъявления каждого стимула испытуемый произносил контрольную фразу в закрепленный возле шеи микрофон. Общая продолжительность эксперимента с одним человеком составляла не более 90 минут. Регистрации ЭЭГ производилась с частотой дискретизации 250 Гц при использовании стандартной схемы размещения электродов «10–20 %» с помощью электроэнцефалографа ЭЭГА-21/26 «Энцефалан-131-03». Запись производилась в течение всего периода наблюдения, испытуемые прослушивали акустические стимулы с закрытыми глазами.

В ходе эксперимента с одним испытуемым формировалась выборка EEG_i из 36-ти паттернов ЭЭГ-сигналов и 72-х паттернов речи. Для мониторинга изменений в характеристиках сигналов каждый фрагмент записи ЭЭГ-сигнала, относящийся к интервалу восприятия одного стимула, был разделен на m фрагментов (e_j^i), каждый продолжительностью 12 секунд (3000 отсчётов):

$$EEG_i = \bigcup_{j=1}^m e_j^i, \quad i = \overline{1, n}, \quad n = 36 \cdot 15 = 540, \quad 15 - \text{количество отведений}.$$

Ключевая фраза, используемая при регистрации речевого сигнала, выбиралась таким образом, чтобы в ней присутствовали основные гласные звуки русской речи. Полученные записи сохранялись в wav-файле с частотой дискретизации 22 050 Гц. Для анализа мы использовали фрагменты речи продолжительностью 20 000 отсчётов, содержащие одно слово. Полученные субъективные (в баллах) оценки стимулов использовались для ранжирования фрагментов ЭЭГ и речевого сигнала внутри блоков с одинаковым знаком эмоции.

Модель эмоционального состояния испытуемого

Для анализа одномерных сигналов в системе «EEG/S» используется процедура реконструкции аттрактора по каждому образцу сигнала и, таким образом, анализ сигналов сводится к изучению свойств аттракторов [6]. Предложена модель аттрактора (MP) включающая описание его проекций в пространстве дискретных признаков и отражающая его морфологические признаки (рис. 1):

$$MP = \langle \cup R_{\max}^{i,j}, \cup \bar{R}_{\max}^i, \cup \gamma_i, \cup k_i^0 \rangle, \quad (1)$$

где i – номер проекции аттрактора; $i = \overline{1, 3}$; j – номер квадранта проекции; $j = \overline{1, 4}$; $R_{\max}^{i,j}$ – длина максимального вектора j -го квадранта i -й проекции аттрактора; \bar{R}_{\max}^i – длина усредненного вектора i -й проекции; γ_i – плотность точек траекторий аттрактора по 4-м центральным ячейкам сетки, покрывающей i -ю проекцию аттрактора; k_i^0 – количество нулевых ячеек в сетке, покрывающей i -ю проекцию аттрактора.

Многочисленные эксперименты подтверждают, что параметры аттрактора связаны с эмоциональной реакцией испытуемого [5–7, 9–10]. На основе этих выводов в системе «EEG/S» сформирована структура модели эмоционального состояния человека (МЭС). Для оценки параметров модели использованы модель (1) и математический аппарат нечетких множеств. Введены 8 лингвистических переменных (ЛП) и правила генерации терм-множеств. Модель МЭС имеет вид:

$$МЭС = (\forall i) ((\cup y_i, \cup T y_i), (\forall j) \cup \mu(T y_i)_j), \quad (2)$$

где y_i (ЛП _{i}) – «длина усредненного вектора \bar{R}_{\max}^i », найденного по i -й проекции аттрактора (y_1 (ЛП₁) – y_3 (ЛП₃)); y_4 (ЛП₄), y_5 (ЛП₅) – «относительное изменение плотности траекторий $d\gamma$ » (при положительных эмоциях и при отрицательных эмоциях, соответственно); y_6 (ЛП₆) – «приращение числа нулевых ячеек dk_{0_1} » (при положительных эмоциях); y_7 (ЛП₇) – «приращение числа нулевых ячеек dk_{0_2} » (при отрицательных эмоциях); y_8 (ЛП₈) – «приращение dk_0 по 2-й проекции аттрактора; $\{T y_i\}$ – терм-множества для оценки признака y_i ; $\mu(T y_i)_j$ – функции принадлежности j -го нечеткого подмножества универсального множества оценок y_i .

Модель МЭС (2), реализованная на основе нечетких оценок характеристик аттракторов биомедицинских сигналов, позволяет осуществлять мониторинг эмоциональных состояний оператора, связанных с восприятием акустических стимулов.

В состав модели МЭС включены только те компоненты, которые используются для вывода информации об эмоциональном состоянии человека в определенный момент времени (t_i) и для оценки изменения его эмоционального состояния на интервале ($t_{i+d} - t_i$).

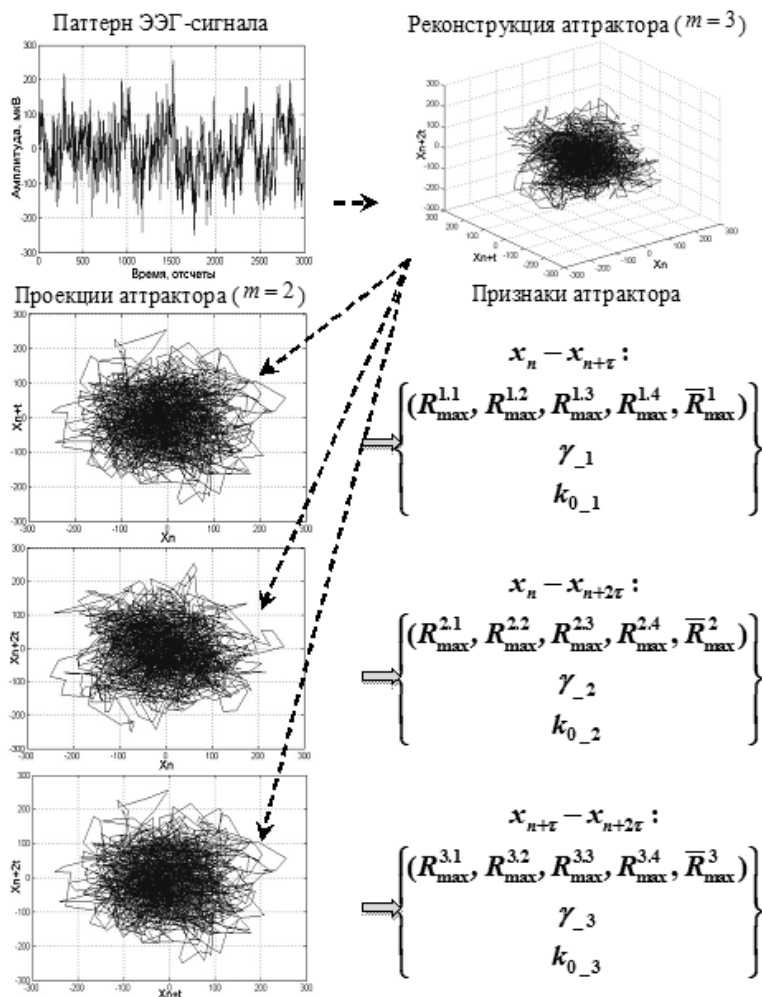


Рис. 1. Обобщенная структура модели аттрактора

Мониторинг эмоционального состояния оператора и прогнозирование тренда эмоций

Задача определения направления развития эмоции может рассматриваться как задача формирования тренда для зависимостей вида $\gamma(t)$ и $k_0(t)$.

Процедура фазификации $\gamma(t)$ и $k_0(t)$ приводит к нечеткости в определении ординат графиков (рис. 2). Практически мы получаем вариант временного ряда с точными оценками по шкале абсцисс (оценки времени) и нечеткими оценками ординат (оценки характеристик аттракторов (1)).

Для выявления тренда было предложено использовать матрицу нечетких отрезков [6], тогда процедура мониторинга эмоционального состояния оператора будет включать три этапа:

1) на основе оценки размеров аттрактора, реконструированного для окна Δt_1 временного ряда $X(t)$ ($\Delta t_1 = t_n - t_1$), определяется знак эмоции $R(Atr(\Delta t_1)) \Rightarrow Rules_valentnost$;

2) на основе нечетких оценок знака приращения плотности ($\Delta\gamma$) аттракторов, реконструированных для двух последовательных окон наблюдения, определяется направление развития эмоциональной реакции: $\Delta W(\gamma(Atr(t_1), Atr(t_2))) \Rightarrow signal(E)$;

3) с помощью нечетких оценок приращения плотности трех аттракторов, реконструированных для трех последовательных окон наблюдения, определяется тренд эмоционального состояния испытуемого, т.е. формируется прогноз направления развития эмоциональной реакции.

Уточнение тренда можно осуществить путем повторения третьего этапа с большим количеством фрагментов сигнала.

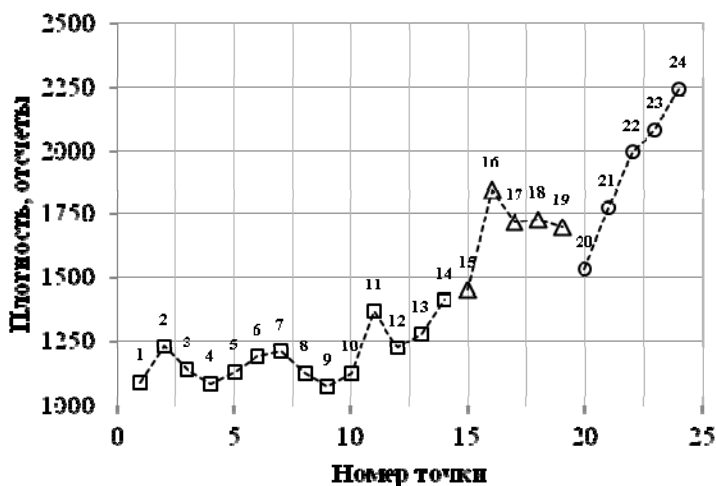
Рассмотрим пример применения алгоритма для анализа нечеткого ряда (см. рис. 2), полученного по оценкам плотности аттракторов, реконструированных по последовательным фрагментам сигнала ЭЭГ (отведение Т6-А2) при восприятии музыкального стимула из множества «Нейтральные звуки» и двух акустических записей из множества «Раздражающие звуки».

С помощью формулы перехода к индексной шкале [9] формируются матрицы приращений плотности M в центрах аттракторов, реконструированных для последовательных фрагментов анализируемых сигналов (например, для участка, соответствующего восприятию одного стимула) (рис. 3). Оценки нечетких приращений плотности для участков графика выделены тонировкой. Матрица является симметричной главной диагонали, поэтому анализируется только ее половина.

Для оценки по индексной шкале тренда всего (или выделенного участка) графика определяется [6]:

$$W_{TO} = (0,5 \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n m_{ij}) / nm, \quad (3)$$

где W_{TO} – оценка всего тренда по индексной шкале; n – число точек; $nm = n(n-1)$.



Стимулы:

□ – «Нейтральный 2», Δ – «Раздражающий 5», ○ – «Раздражающий 8»

Рис. 2. Изменение плотности аттрактора при восприятии акустических стимулов (нейтрального и раздражающего типов)

0	-0,476	-0,918	-1,088	-1,418
-0,476	0	-0,442	-0,612	-0,942
-0,918	-0,442	0	-0,17	-0,5
-1,088	-0,612	-0,17	0	-0,33
-1,418	-0,942	-0,5	-0,33	0

Рис. 3. Матрица приращений плотности аттракторов, полученных при восприятии стимула «Раздражающий 8»

В рассматриваемом примере: $W_{TO} = (0,5(-13,792))/(5(5 - 1)) = -0,3448$. Для полученной индексной оценки тренда W_{TO} (3) выполняется процедура фазификации. Предварительно формируются соответствующие функции принадлежности. При этом используется допущение о том, что переход от графика с возрастающей функцией к убывающей зависимости происходит через состояние «ровный».

На рис. 4 показан вариант для пяти функций принадлежности, позволяющих определить нечеткие множества: «ровный», «немного возрастает», «возрастает», «немного убывает», «убывает».

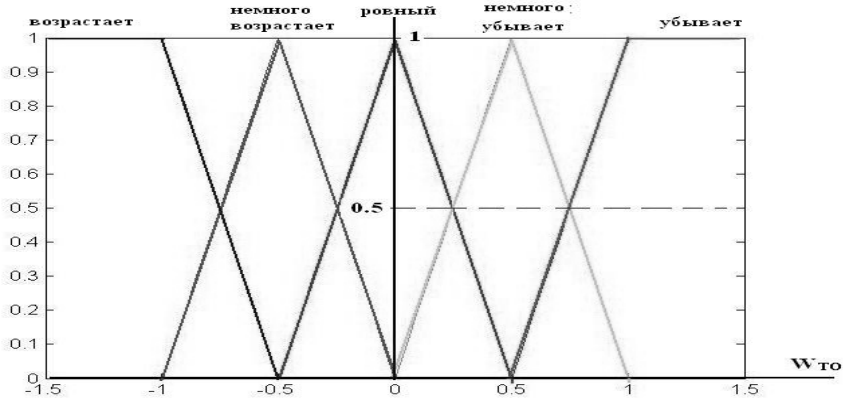


Рис. 4. Функции принадлежности для нечеткой оценки переменной W_{TO}

Таким образом, для $W_{TO} = -0,3448$ формируется вектор оценок функций принадлежности (ФП) характеризующих соответствие тренда плотности аттракторов нечетким множествам:

- «немного возрастающий тренд» с ФП = 0,67;
- «ровный тренд» с ФП = 0,33.

С помощью правил формируется заключение: «имеется тенденция к усилению негативных эмоций».

В ходе исследований проведены эксперименты со стимулами разной модальности. Испытуемому предъявлялись 24 акустических стимула: музыкальные клипы (5 нейтральных) и 19 стимулов с маркером «Раздражающие звуки». Фрагментарный график (см. рис. 2) иллюстрирует увеличение плотности аттракторов при переходе от нейтральных стимулов к раздражающим звукам.

Анализ результатов экспериментов (табл. 1) показывает, что применение описанного алгоритма позволяет выявлять изменения тренда эмоциональной реакции (эмоционального состояния (ЭС)) испытуемого на любом выделенном участке наблюдений. Причем видно, что на протяжении восприятия одного стимула плотность точек аттрактора меняется много меньше, чем при рассмотрении участков, связанных с изменением вида стимулов.

Результаты экспериментов

Границы наблюдений (номер точки)	W_{TO}	Функция соответствия нечеткому множеству		Вид стимула	Общая оценка тренда
		Возрастание участка	Ровный участок		
От 1 до 14	-0,0765	0,14	0,86	Нейтральный	Изменений в ЭС нет
От 15 до 19	-0,0744	0,13	0,87	Раздражающий 5-й	Изменений в ЭС нет
От 20 до 24	-0,345	0,67	0,33	Раздражающий 8-й	Усиление -Э (соответствие 0,67)
От 14 до 19	-0,14	0,27	0,73	Раздражающий 5-й	Изменений в ЭС нет
От 9 до 24	-0,38	0,75	0,25	Раздражающие 5-8	Усиление -Э (соответствие 0,75)

Заключение

Приведенные результаты свидетельствуют о возможности успешного применения алгоритма оценки тренда характеристик аттракторов, реконструированных по биомедицинским сигналам, для интерпретации направления развития эмоциональных реакций человека.

Выявлено совпадение с итогами самооценки испытуемых, а также установлена взаимосвязь с результатами и фактами, представленными в независимых источниках [8].

Дальнейшее направление исследований видится в расширении модели интерпретатора эмоций новыми свойствами (в частности, оценкой скорости развития эмоций).

Список литературы

1. Rangayyan R.M. Biomedical Signal Analysis: A Case-Study Approach. IEEE Press and Wiley. New York, 2002. 516 p.
2. Chetouani M., Mahdhaoui A., Ringeval F. Time-scale feature extractions for emotional speech characterization // Cognitive Computation. 2009. Vol. 1. No. 2. P. 194–201.

3. Soleymani M., Koelstra S., Patras I., Pun T. Continuous emotion detection in response to music videos // IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition and Workshops. 2011. P. 803–808.

4. Koelstra S. Affective and implicit tagging using facial expressions and electroencephalography: PhD. Dissertation. Queen Mary University of London, 2012. 167 p.

5. Филатова Н.Н., Сидоров К.В. Интерпретация характеристик эмоций с помощью анализа аттракторов, реконструированных по ЭЭГ-сигналам // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2016. Т. 11, № 1. С. 57–76.

6. Filatova N.N., Sidorov K.V., Terekhin S.A., Vinogradov G.P. The system for the study of the dynamics of human emotional response using fuzzy trends // Proceedings of the First International Scientific Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. 2016. Vol. 2, No. 3. P. 175–184.

7. Филатова Н.Н., Сидоров К.В., Ханеев Д.М. Классификация знака эмоций человека по ЭЭГ и речевым сигналам при аудиовизуальной или обонятельной стимуляции // XVIII Международная научно-техническая конференция «НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2016». Ч. 3. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 183–193.

8. Liu Y., Sourina O., Nguyen M.K. Real-time EEG-based emotion recognition and its applications // Transactions on Computational Science XII: Special Issue on Cyberworlds. 2011. P. 256–277.

9. Старченко И.Б., Перервенко Ю.С., Борисова О.С., Момот Т.В. Методы нелинейной динамики для биомедицинских приложений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 9 (110). С. 42–51.

10. Перервенко Ю.С. Исследование инвариантов нелинейной динамики речи и принципы построения системы аудиоанализа психофизиологического состояния: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.17. Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2009. 175 с.

А.А. ЭЙДЛИН, А.В. САМСОНОВИЧ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
a.aidlin@gmail.com

ПОСТРОЕНИЕ СЛАБЫХ СЕМАНТИЧЕСКИХ КАРТ СМЫСЛОВ СЛОВ*

Рассматривается задача построения слабой семантической карты смыслов слов на основе словаря синонимов и антонимов. Предложенный подход к построению семантических карт снимает ограничение существующей семантической карты слов, обусловленное полисемией – наличием нескольких смыслов у одного слова. С использованием тезауруса Microsoft Word построена семантическая карта смыслов для русского и англ-

* Данная работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 15-11-30014.

лийского языка. Построенная семантическая карта смыслов сравнивается с семантической картой слов.

Ключевые слова: *семантическое пространство, когнитивное моделирование, семантический поиск, пространство аффектов.*

Введение

Семантические карты, или семантические пространства, получили широкое распространение во множестве областей знаний, начиная от обработки предпочтений и семантического поиска и заканчивая построением карт мозга. Семантические карты естественного языка – не единственный, но наиболее известный их вариант. Такие карты строятся с помощью испытуемых, которые либо ранжируют слова, либо предоставляют психометрические показатели. Другим подходом к построению семантических карт является автоматическая обработка корпусов текстов. Далее будем рассматривать именно его. Примерами являются латентный семантический анализ [1] и многомерное шкалирование [2].

Основная идея семантической карты – разместить осмысленные фрагменты естественного языка, к примеру, слова и фразы, в некотором абстрактном пространстве таким образом, чтобы геометрические и топологические отношения между точками отражали семантические отношения между элементами, которым точки соответствуют. Существует два вида семантических карт, удовлетворяющих этому требованию: (1) карта, отражающая семантическую несхожесть с помощью геометрического расстояния (метрики несхожести); (2) карта, координаты которой имеют точную семантическую интерпретацию. Построить карту, обладающую обоими свойствами, к настоящему моменту не удалось. Карты со свойствами (1) и (2) называются соответственно сильными и слабыми.

Слабые семантические карты слов могут быть построены на основе различных данных о семантике слов или их семантических отношениях. В частности, это можно сделать на основе словаря синонимов и антонимов [3], и в этом случае один из возможных методов – «стягивать» синонимы и «расталкивать» антонимы [4]. Одной из проблем, возникающих при применении последнего, является полисемия: слово, которое должно быть представлено ровно одной точкой на карте, может иметь несколько смыслов, соответствующих различным позициям на карте. Естественным решением данной проблемы является использование смыслов слов в качестве элементов карты вместо отдельных слов. Ранее было замечено, что реализация этой идеи на основе базы данных WordNet [5] опирается в

следующую проблему: в базе отсутствуют синонимы смыслов, и при этом каждый смысл имеет не более одного антонима. Таким образом, граф антонимов содержит только изолированные друг от друга пары слов [6].

В данной работе развивается новый подход к построению семантических карт смыслов на основе словаря синонимов и антонимов. Взяв в качестве исходных данных тезаурусы Microsoft Word для русского и английского языка, были построены соответствующие семантические карты смыслов и проведено их сравнение с построенными ранее картами слов.

Методика построения семантической карты смыслов

Для построения семантической карты смыслов слов использовались тезаурусы Microsoft Office 2013 и 2016 для русского и английского языка. Первым шагом было извлечение тезауруса с помощью API Microsoft Word для MATLAB. Детали извлечения тезауруса описаны в работах [4, 7]. Новым элементом в данной работе является раздельное извлечение смыслов каждого слова. Смысл слова в тезаурусе Microsoft Word представлен набором слов. При этом предполагалось, что два смысла являются синонимами, если соответствующие наборы слов имеют общие элементы. Антонимами считались смыслы, для которых соответствующие наборы слов содержали пары антонимов (один антоним – в одном наборе, другой – в другом).

Следующий шаг состоял в построении семантической карты смыслов слов на основе компонента связности графа синонимов и антонимов смыслов. Идея данного метода – та же, что и в предыдущих работах (см., напр., [4]). Задача решается путём минимизации функционала, зависящего от координат слов x в $d = 26$ -мерном евклидовом пространстве (здесь матрица W содержит единицу в строке i и столбце j значение -1 , если слова i и j являются антонимами, 1 , если синонимами, и 0 в остальных случаях):

$$H(x) = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N W_{ij} x_i x_j + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N |x_i|^4.$$

После минимизации к полученным векторам применяется метод главных компонент, и из главных компонент отбираются наиболее значимые (с наибольшим значением дисперсии) так, чтобы сумма их дисперсий превысила 95 % от суммарной величины дисперсии. Эти компоненты используются в качестве координат семантической карты. Семантика координат определяется путём анализа отсортированных по ним списков слов.

Для сравнения построенной карты с имеющимися семантическими картами слов проводился анализ распределения пар синонимов и антонимов по углам между соответствующими векторами.

Анализ построенной семантической карты

Были построены и проанализированы две семантические карты смыслов слов: для русского и для английского языка. Карта смыслов русского языка содержит 234 676 смыслов слов, представленных наборами слов (синсетами). Максимальное количество слов в синсете – 64. Общее количество слов, фигурирующих в синсетах, составило 491 355. При этом компонент связности графа содержит 2 792 528 пар синонимов и 1 790 811 пар антонимов. Средняя длина синсета – 5,1; стандартное отклонение – 4,9.

Карта смыслов английского языка содержит 92 878 различных смыслов слов, максимальное количество слов в синсете – 34, общее количество слов в словаре составило 187 689. При этом компонент связности графа содержит 5 824 923 пар синонимов и 514 747 пар антонимов. Средняя длина синсета – 8,5; стандартное отклонение – 2,8.

Для сравнения внутренней согласованности карт смыслов с внутренней согласованностью ранее построенных карт слов было изучено распределение углов между векторами пар синонимов и антонимов. При этом острый угол между векторами антонимов считался некорректным, поскольку целью оптимизации была антипараллельность векторов антонимов. Аналогично, некорректным считался тупой угол между векторами синонимов, поскольку в результате оптимизации стремились достичь параллельности векторов синонимов. Результаты данного анализа представлены в табл. 1. Данные по картам слов были взяты из [4] для английского, немецкого, французского и из работы [7] для русского языка.

Таблица 1

Доля некорректных значений углов между парами векторов на различных семантических картах

№ п/п	Язык, тип семантической карты	Синонимы	Антонимы
1	Русский, карта слов	0,09 %	0,07 %
2	Русский, карта смыслов	1,66 %	2,26 %
3	Английский, карта слов	2,77 %	0,94 %
4	Английский, карта смыслов	7,59 %	1,68 %
5	Немецкий, карта слов	6,86 %	7,07 %
6	Французский, карта слов	5,75 %	6,97 %

Также были построены гистограммы распределения углов между парами синонимов и антонимов для семантических карт русского и английского языка. Результаты представлены на рис. 1.

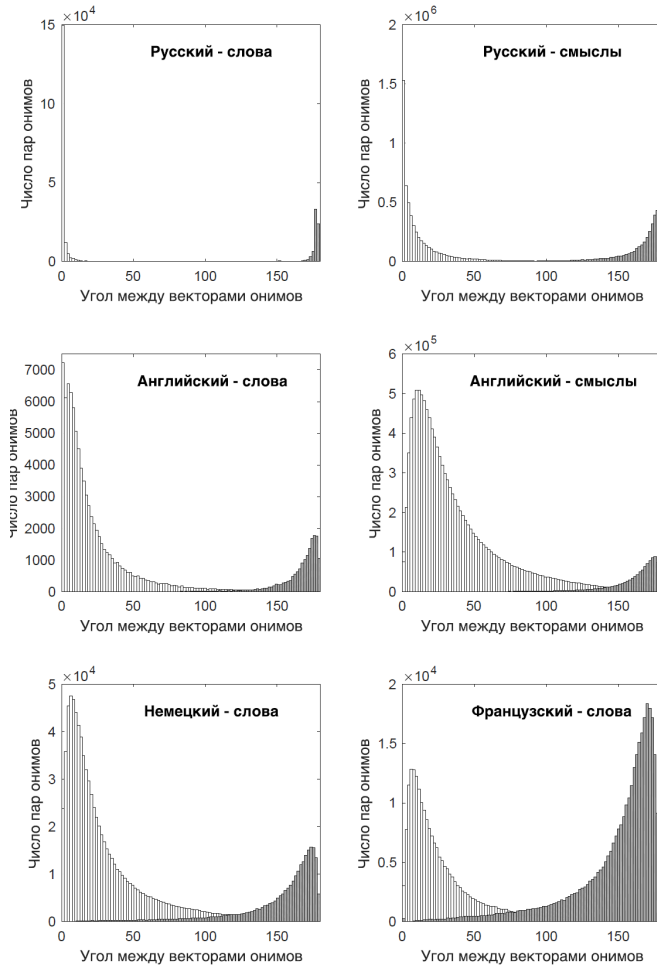


Рис. 1. Гистограммы распределения величин углов между синонимами (белым) и антонимами (серым) для различных семантических карт. По горизонтальной оси отложен угол в градусах, по вертикальной – количество пар слов/синсетов, угол между которыми попадает в соответствующий диапазон. Наверху слева – карта слов русского языка, справа – карта смыслов слов русского языка, посередине слева – карта слов английского языка, справа – карта смыслов английского языка, внизу – карта слов немецкого (слева) и французского (справа) языка

Вопреки ожиданиям, распределение углов является более размытым для карты смыслов, чем для карты слов. Более того, доля некорректных углов оказалась выше как для английского, так и для русского языка. Однако это не свидетельствует о более низком качестве семантической карты смыслов по сравнению с семантической картой слов. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что количество связей между смыслами значительно превышает число связей между словами в картах слов. Так, в семантической карте смыслов русского языка на один синсет приходится 11,9 пар антонимов и 7,63 пары синонимов, в то время как в семантической карте слов – всего 2,1 пары синонимов и 0,8 пары антонимов. Для английского языка цифры сходные: на один синсет приходится 5,3 пары синонимов и 1,1 пара антонимов, в то время как на одно слово – всего 1,9 пары синонимов и 0,4 пары антонимов соответственно.

Предположение о том, что качество новой карты выше, косвенно подтверждается тем, что распределение смыслов оказывается строго маломерным: если ранее последние главные компоненты в сумме составляли менее 5 % дисперсии, то теперь они обращаются в нуль с точностью до ошибки округления (рис. 2). Так, для семантической карты смыслов английского языка величина дисперсии первой главной компоненты составляет 0,599, пятой – 0,015, а шестой – $1,4 \cdot 10^{-10}$. Для семантической карты смыслов русского языка величина дисперсии первой главной компоненты – 0,621, шестой – 0,011, а седьмой – $8,8 \cdot 10^{-7}$. В семантической карте слов подобного не наблюдается: величина дисперсии падает ниже 10^{-3} лишь на 23-й компоненте.

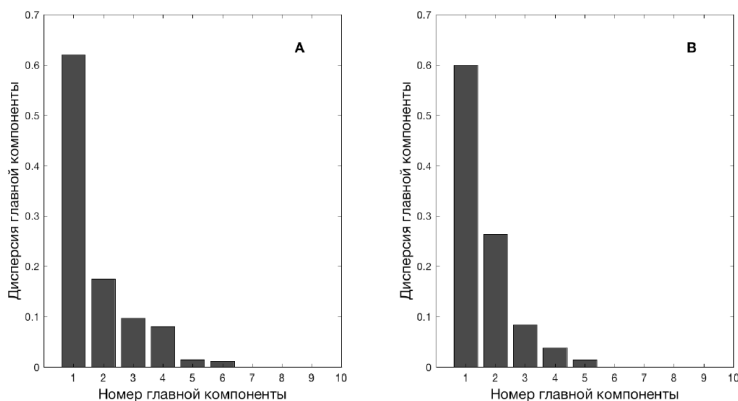


Рис. 9. Дисперсия главных компонент для семантической карты смыслов английского (А) и русского (В) языка

Заключение

Предложен новый подход к построению слабых семантических карт по словарям синонимов и антонимов, основанный на смыслах слов. Использование смыслов вместо самостоятельных слов позволяет решить проблему полисемии. Анализ семантических карт смыслов слов, построенных для русского и английского языка, не позволяет однозначно утверждать о более высоком качестве новых семантических карт. Однако косвенно в пользу данного вывода свидетельствует малая размерность полученных карт.

Последний результат сам по себе является неожиданным. Можно предполагать, что он обусловлен особенностями природы человеческого языка, в котором присутствует ограниченное количество независимых семантических измерений – порядка 6–7. Дальнейшим развитием работы будет построение семантических карт смыслов слов для других языков.

Список литературы

1. Landauer, T.K., Dumais, S.T. A solution to Plato's problem: The latent semantic analysis theory of acquisition, induction, and representation of knowledge // *Psychological Rev.* 1997. No. 104. P. 211–240.
2. Cox, R.F., Cox, M.A. *Multidimensional scaling*. Chapman & Hall. 1994.
3. Cambria, E., Hussain, A. *Sentic Computing: Techniques, Tools, and Applications*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2012.
4. Samsonovic, A. V., Ascoli, G. A. Principal Semantic Components of Language and the Measurement of Meaning // *PLoS ONE* 2010. V. 5. No. 6.
5. <https://wordnet.princeton.edu/>
6. Samsonovich, A.V., Ascoli, G.A. Universal dimensions of meaning derived from semantic relations among words and senses: Mereological completeness vs. ontological generality // *Computation* 2014. V. 2 No. 3. P. 61–82.
7. Samsonovich, A.V. Weak semantic map of the Russian language: Preliminary results // *Procedia Computer Science*, 2016. V. 88. P. 538–543.

И.Г. СИЛЬКИС

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва
e-mail: isa-silkis@mail.ru

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ ВОСПРИЯТИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СУБСЕКУНДНЫХ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕНСОРНЫХ СТИМУЛОВ *

Предложен механизм одновременной обработки физических свойств и субсекундных временных параметров сенсорных стимулов в нейронных цепях коры – базальные ганглии (субталамическое ядро – педункулопонтинное ядро) – таламус – кора. Из механизма следует, что любые факторы, усиливающие (ослабляющие) нейронное отображение физических свойств стимула в коре, уменьшают (увеличивают) продолжительность циркуляции активности в указанных цепях, повышая (снижая) тактовую частоту обработки, что приведет к переоценке (недооценке) времени.

Ключевые слова: *обработка сенсорной информации, восприятие времени, базальные ганглии.*

Введение

Несмотря на то, что оценка времени является одной из важнейших функций мозга, ее механизмы являются предметом исследований и дискуссий. В настоящее время обсуждаются несколько подходов к пониманию этой проблемы [1, 2], причем многие исследователи разделяют мнение о том, что оценка коротких интервалов времени зависит от взаимодействия базальных ганглиев (БГ), префронтальной коры (ПФК) и дофаминергических влияний [3]. На основании анализа 150 наиболее цитируемых современных работ по этой тематике отмечено, что способность точно оценивать длительность стимулов и интервалов между ними зависит от многих факторов, включая физические свойства стимула, процессы внимания, мотивацию и эмоции [2]. Недавно сформулирован общий принцип сенсорной обработки, который объединяет влияние указанных факторов на субъективное восприятие времени [1, 4]. Согласно этому принципу, различные переменные, улучшающие (ухудшающие) восприятие стимула, должны увеличить (уменьшить) воспринимаемую длительность.

* Данная работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда, грант № 16-15-10403.

Ранее нами были предложены возможные механизмы восприятия субсекундных временных интервалов при участии БГ и влияния нейромодуляторов на это восприятие [5, 6]. Эти механизмы могут быть использованы для понимания процессов, лежащих в основе общих принципов обработки, выдвинутых в работах [1, 4, 7] без анализа процессов.

Целью настоящей работы являлось дополнение предложенного нами ранее механизма восприятия времени с учетом влияний таких факторов, как интенсивность стимула, внимание к стимулу, вызванные им эмоции и функциональное состояние организма.

Описание унифицированного нейронного механизма совместной обработки физических и временных параметров сенсорных стимулов

Предлагаемый механизм базируется на предположении о том, что нет необходимости в определении временных параметров сенсорных стимулов независимо от их физических свойств. Обработка всей информации о стимулах осуществляется совместно в параллельных сенсорных и лимбических нейронных цепях, включающих кору и БГ (рис. 1). Составной частью унифицированного механизма является механизм обработки физических свойств сенсорных стимулов (зрительных и слуховых), предложенный нами ранее [8, 9]. Необходимое для осознания стимула повторное возбуждение коры происходит благодаря циркуляции активности в цепи возбуждения: кора – субталамическое ядро (СТЯ) – педункулопонтинное ядро (ППЯ) – таламус – кора и в растормаживающей цепи: кора – БГ – таламус – кора (К – БГ – Т – К) (см. рис. 1). Проецирующиеся в таламус нейроны ППЯ, как и нейроны таламуса, а также нейроны СТЯ находятся под тормозным контролем со стороны БГ (см. рис. 1). Поэтому, существенную роль в циркуляции активности и степени повторного возбуждения нейронов коры играет растормаживание со стороны БГ.

Известно, что параллельные цепи К – БГ – Т – К организованы топически и являются замкнутыми [10]. На основании данных об особенностях внутриклеточных процессов в шипиковых нейронах входного ядра БГ – стриатума, нами было указано на то, что правила модуляции для «сильных» и «слабых» корково-стриатных входов должны быть противоположны по знаку. Благодаря этому, при циркуляции активности в растормаживающих цепях в каждой из областей коры усиливается активность тех групп корковых нейронов, которые сильно возбуждали стриатум и одновременно ослабляется активность групп корковых нейронов, слабо возбуждавших стриатум во время выделения в нем дофамина в ответ на сенсорные стимулы. По мере накопления циклов циркуляции активности в

рассматриваемых цепях происходит увеличение контрастного усиления активности первоначально возбужденных стимулом нейронов новой коры, на которых формируется нейронное отображение физических свойств стимула, так что он начинает восприниматься более четко. [8, 9].

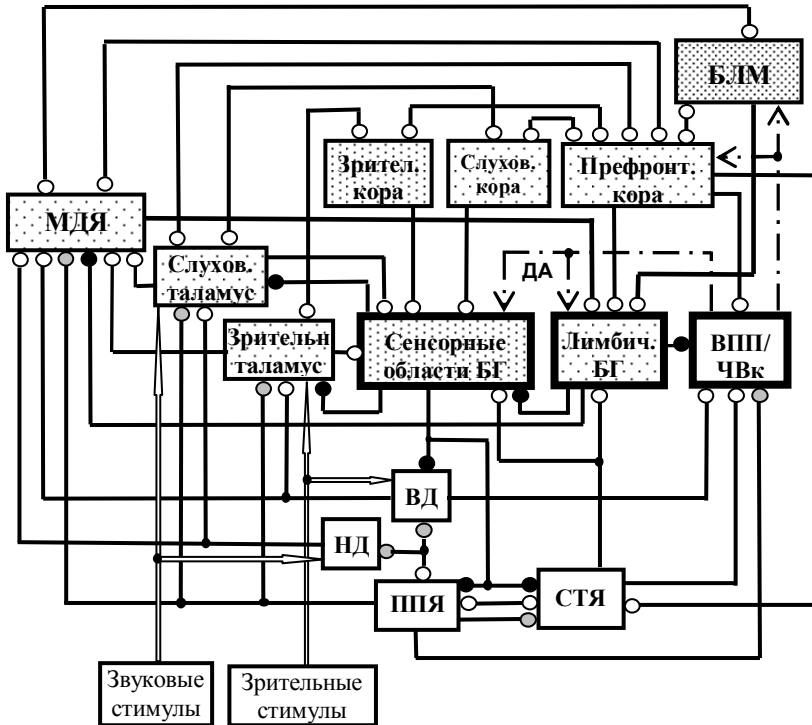


Рис. 1. Схема нейронной сети, участвующей в обработке информации: ВПП – вентральное поле покрышки; ЧВк– компактная часть черного вещества; ВД и НД – верхнее и нижнее двуххолмие, соответственно. Маленькие белые, черные и серые кружки – возбуждающие, тормозные и холинергические входы соответственно; штрих-пунктирные линии со стрелками – дофаминергические входы (ДА); линии с двумя маленькими белыми кружками – реципрокные возбуждающие связи. Остальные сокращения приведены в тексте

В рамках унифицированного механизма нами предположено, что тактовая частота обработки информации, от которой зависит оценка временных параметров стимулов, обратно пропорциональна времени, затрачиваемому на поступление в кору повторной волны возбуждения. Это время

зависит от степени растормаживания со стороны нейронов выходных ядер БГ нейронов таламуса, через которые в кору поступает возбуждение (см. рис. 1). Чем сильнее растормаживаются и возбуждаются нейроны таламуса, тем меньше латентный период (ЛП) возбуждения нейронов коры и больше тактовая частота, а также больше контрастное усиление нейронного отображения стимула в коре. Мы полагаем, что длительность стимула или текущего интервала между стимулами может отображаться числом разрядов нейронов коры, которое пропорционально числу циклов повторного возбуждения коры. Такой механизм должен быть однотипным для стимулов разных сенсорных модальностей в силу сходства функционирования топически организованных параллельных цепей К – БГ – Т – К [5].

Таким образом, в нашей модели временные параметры стимула и его физические свойства отображаются в активности нейронов коры, а не в активности шипиковых нейронов стриатума, как это предполагается рядом авторов [11]. Следует отметить, что не только шипиковые нейроны, но и их клетки-мишени в других ядрах БГ являются ГАМКергическими, поэтому не ясно как закодированная в них информация о времени (если бы это имело место) может передаваться дальше.

На основании собственных экспериментальных данных о наличии мод в распределениях ЛП реакций нейронов зрительного поля V2, а также аналогичных литературных данных для реакций нейронов других сенсорных областей коры и таламуса на свет, звук и тактильное раздражение, нами проведена оценка времени, затрачиваемого на прохождение в кору повторной волны возбуждения [5]. Это время примерно одинаково для разных сенсорных модальностей и составляет 25–30 мс [5].

Из предлагаемого механизма следует, что чем сильнее стимул (ярче, громче), тем выше будет первоначальное возбуждение нейронов коры и эффективнее возбуждение пиковых нейронов стриатума. Благодаря этому, усилится растормаживание нейронов таламуса со стороны нейронов выходных ядер БГ и уменьшится ЛП повторного возбуждения коры (см. рис. 1). В результате увеличится тактовая частота обработки информации, так что воспринимаемая длительность таких стимулов или интервалы между ними будут переоцениваться. На степень вызванного стимулом первоначального возбуждения нейронов коры могут влиять также внимание к стимулу, его эмоциональная значимость, а также состав нейромодуляторов, определяющих эффективность корково-стриатных входов.

Влияние внимания на оценку времени

Мы полагаем, что внимание является не отдельным процессом, а составной частью обработки физических свойств сенсорных стимулов [12, 13]. Согласно предложенному нами механизму, усиление нейронного отображения в коре стимула, на который было направлено внимание, вызвано увеличением выделения дофамина в стриатуме и последующим усилением растормаживания таламуса со стороны БГ. Поскольку внимание приводит к увеличению активности нейронов коры, отображающих физические свойства стимула, из предлагаемого унифицированного механизма обработки сенсорной информации следует, что оно должно привести к увеличению тактовой частоты и переоценке времени. Наоборот, в отсутствие внимания стимул будет казаться короче, т.е. недооцениваться, и при этом его длительность будет оцениваться менее точно.

Влияние эмоций и мотивации на оценку времени

Поскольку с эмоциями связана активность базолатеральной миндалины (БЛМ), нейроны которой, как и нейроны гиппокампа и ПФК, иннервируют шипиковые клетки вентрального стриатума, они могут влиять на функционирование лимбической нейронной цепи ПФК – БГ – Т – ПФК (см. рис. 1). Ранее нами анализировались возможные механизмы функционирования лимбических цепей [14]. Были учтены данные о том, что благодаря наличию конвергирующих входов, ответы нейронов вентрального стриатума на стимуляцию ПФК усиливались, если им предшествовала стимуляция БЛМ. Активность нейронов миндалины может быть усилена сенсорными стимулами за счет наличия входов в БЛМ из медиодорзального ядра таламуса (МДЯ), получающего возбуждение от таламических ядер, нейроны которых реагируют на сенсорные стимулы (см. рис. 1). Кроме того, МДЯ возбуждает ПФК, реципрокно связанную с БЛМ. Из предлагаемого унифицированного механизма сенсорной обработки следует, что связанное с мотивацией и эмоциями увеличение активности БЛМ должно облегчить возбуждение определенной группы шипиковых нейронов вентрального стриатума, способствуя прохождению сигналов из ПФК через БГ. Последующее усиление растормаживания нейронов таламуса и коры, вызванное мотивацией и эмоциями, должно привести к увеличению тактовой частоты и, следовательно, к переоценке времени.

Влияние нейромодуляторов на оценку времени

Из проведенного нами анализа влияний некоторых нейромодуляторов на оценку времени следует, что к увеличению тактовой частоты и переоценке длительности интервалов могут приводить дофаминергические препараты или агонисты дофаминовых D1 и D2 рецепторов, а также антагонисты мускариновых M2 рецепторов, воздействие на которые облегчает растормаживание таламуса со стороны БГ [6]. Антагонисты M2 и D2 рецепторов, препятствующие длительной депрессии возбудительных входов к пирамидным нейронам новой коры, также могут приводить к увеличению тактовой частоты. Поскольку D2 и M2 рецепторы имеются не только на пирамидных клетках, но и на ГАМКергических интернейронах коры, активация указанных рецепторов может привести к снижению эффективности возбуждения тормозных клеток, последующему растормаживанию пирамидных нейронов и увеличению их активности. В результате тактовая частота может увеличиться. Таким образом, один и тот же нейромодулятор может оказывать разнонаправленное влияние на оценку времени. Поскольку рецепторы характеризуются разным сродством с медиатором, результирующий эффект должен зависеть как от концентрации нейромедиатора и плотности рецепторов разных типов, так и от силы тормозного входа [6]. Следует отметить, что холинергическая и дофаминергическая системы взаимодействуют, причем это взаимодействие влияет на функционирование БГ и является комплексным [15].

Сопоставление следствий модели с экспериментальными данными

Со следствиями предлагаемого унифицированного механизма согласуются данные о том, что в случае произвольного внимания время переоценивается, а чем меньше внимания к продолжительности стимула, тем короче кажется его длительность [16]. У некоторых пациентов с дефицитом внимания и гиперактивностью наблюдались тенденция к недооценке длительности интервалов в диапазоне от десятков мс до секунд [17]. В согласии со следствиями предлагаемого механизма показано, что по мере усиления эмоционального возбуждения переоценка времени увеличивается независимо от характера эмоции [18, 19]. Переоценка интервалов длительностью от 600 до 1600 мс наблюдалась, например, при предъявлении сердитых или вызывающих тревогу лиц [20].

Имеется ряд экспериментальных свидетельств того, что изменения концентрации дофамина приводят к искаженной оценке времени [21]. В согласии со следствием модели показано, что пациенты с болезнью Пар-

кинсона, в основе которой лежит гибель дофаминергической клеток, часто недооценивают временной интервал [22]. По данным работы [23] у пациентов с болезнью Паркинсона нарушения в оценке коротких интервалов (от мс до 2 с) наблюдались тогда, когда при решении задач требовалось привлечь внимание и когнитивные процессы. Из нашей модели следует, что при болезни Альцгеймера, для которой характерны снижение концентрации ацетилхолина и плотности холинорецепторов в коре, недооценки или переоценки времени зависят от того, какой тип мускариновых рецепторов (M1 или M2) преимущественно активируется в ПфК. Например, при сниженном воздействии на M1 рецепторы на нейронах ПфК активность последних будет меньше, чем в норме и снизится корково-стриатное возбуждение, так что время должно недооцениваться. Действительно, показано, что при больших дозах антагониста мускариновых рецепторов интервалы чаще воспринимались как более короткие [24].

Отличия предлагаемого унифицированного механизма восприятия времени от современных моделей

Среди современных моделей оценки времени выделяют три типа. В моделях типа пейсмейкер-аккумулятор (Pacemaker–Accumulator) течение времени оценивается числом накопленных импульсов, генерируемых центральным пейсмейкером [25]. В частотных моделях, например, модели «частоты импульсаций стриатума» (Striatal Beat Frequency, SBF) [26], восприятие интервалов базируется на возбуждении корковыми осцилляторами шипиковых нейронов стриатума. В моделях последовательных состояний (Sequential sampling models) кодируется время задержки от предшествующего события [27].

Основное отличие предлагаемого нами механизма состоит в том, что оценка физических и временных параметров стимула осуществляется совместно в одних и тех же нейронных цепях, тогда как в других моделях предполагается, что восприятие свойств сенсорных стимулов и восприятие времени основываются на механизмах, которые функционируют согласованно, но раздельно [28]. Недавно высказано предположение, что импульсы для отсчета времени могут поступать от клеток, отображающих стимулы, а поскольку изменения самого стимула и его когнитивной составляющей модулируют это нейронное отображение, они могут влиять и на восприятие времени [1]. Это предположение частично сходно с предлагаемым нами механизмом, однако в нашей модели нет необходимости в генерации специальных импульсов для отсчета времени и нет необходимости вводить такое понятие, как «внутренние часы», так как оцениваемое время определяется числом циклов повторного возбуждения нейро-

нов коры, отображающих стимул, и длительностью каждого цикла. В предлагаемом нами механизме квантование времени связано с существованием тактовой частоты обработки всей информации о стимуле.

Как и в нашей модели, в SBF модели предполагается, что длительность интервала зависит от эффективности входов из коры в стриатум, однако в SBF модели интервалы различной длительности независимо кодируются разными группами нейронов стриатума, управляемых отдельными пулами корковых осцилляторов [29]. В таком случае сенсорный стимул одного и того же типа, но разной длительности, должен кодироваться разными группами клеток как в коре, так и в стриатуме. Как уже указывалось, ГАМКергические нейроны стриатума не могут передавать возбуждение. От SBF модели наша модель отличается тем, что информация о физических свойствах и временных параметрах стимулов кодируется в активности одних и тех же нейронов коры. В разработанной недавно формализованной SBF модели кора возбуждает однотипные шипиковые клетки [17]. Однако не учтено то обстоятельство, что одни и те же нейроны коры одновременно возбуждают и стрионигральные, и стриопаллидарные шипиковые нейроны, которые функционально различаются. Эффективность корковых входов к этим нейронам разнонаправлено модулируется дофамином [30]. Именно разнонаправленное влияние дофамина на стрионигральные и стриопаллидарные шипиковые клетки позволяет синергично растормаживать только определенные группы нейронов таламуса и коры и создавать контрастное отображение стимула. Поскольку цепи К – БГ – Г – К являются замкнутыми, через БГ и таламус растормаживается только та группа нейронов коры, которая отображает свойства стимула. В активности именно этой группы отображаются также временные параметры стимула. Таким образом, в нашей модели, в отличие от других моделей, нет необходимости предполагать, что однотипные одномодальные стимулы разной длительности кодируются разными группами клеток.

Выводы

В работах [1, 4, 7] предложены принципы обработки, объединяющие влияние на субъективное восприятие времени таких параметров как интенсивность стимула, его значимость, внимание к свойствам стимула. Согласно этим принципам, переменные, которые улучшают (ухудшают) четкость отображения стимула, должны увеличить (уменьшить) воспринимаемую длительность. Мы полагаем, что предлагаемый нами унифицированный механизм одновременной обработки физических свойств и субсекундных временных параметров сенсорных стимулов представляет собой нейрофизиологическую основу принципов обработки, выдвинутых в ра-

ботах [1, 4, 7]. На основе анализа особенностей функционирования нейронных цепей, включающих БГ, сенсорные области коры, ПФК, БЛМ и таламус, нами впервые предложено возможное объяснение того, почему разные факторы, которые усиливают (ослабляют) нейронное отображение физических свойств стимула в новой коре, тем самым улучшая (ухудшая) его восприятие, приводят к переоценке (недооценке) воспринятого времени. Мы полагаем, что это этот эффект связан с ускорением (замедлением) циркуляции активности в цепях повторного возбуждения и растормаживания нейронов коры, отображающих стимул, что должно привести к увеличению (снижению) тактовой частоты обработки всей информации о стимуле, включая его временные параметры.

Список литературы

1. Matthews W.J., Meck W.H. Temporal cognition: connecting subjective time to perception, attention, and memory // Psychol. Bull. 2016. V. 142. № 8. P. 865–907.
2. Teki S. A citation-based analysis and review of significant papers on timing and time perception // Front. Neurosci. 2016. V.10. Article 330.
3. Agostino P.V., Gatto E.M., Cesarini M. et al. Deficits in temporal processing correlate with clinical progression in Huntington's disease // Acta Neurol. Scand. 2017. [Epub ahead of print].
4. Teki S., Grube M., Griffiths T.D. A unified model of time perception accounts for duration-based and beat-based timing mechanisms // Front. Integr. Neurosci. 2012. V. 5. Article 90.
5. Силькис И.Г. Возможный механизм участия цепей кора – базальные ганглии – таламус – кора в восприятии времени // Успехи физиол. наук. 2011. Т. 42. № 2. С. 41–56.
6. Силькис И.Г. Возможные механизмы влияния нейромодуляторов на восприятие временных интервалов // Нейрохимия. 2012. Т. 29. № 2. С. 160–170.
7. Eagleman D.M., Pariyadath V. Is subjective duration a signature of coding efficiency? // Philos. Trans. R. Soc.Lond. B. Biol. Sci. 2009. V. 364. № 1525. P. 1841–1851.
8. Силькис И.Г. Вклад синаптической пластичности в базальных ганглиях в обработку зрительной информации (гипотетический механизм) // Журн. высш. нерв. деят. 2006. Т. 56. № 6. С. 742–756.
9. Силькис И.Г. О роли базальных ганглиев в формировании рецептивных полей нейронов первичной слуховой коры и механизмы их пластичности // Успехи физиол. наук. 2015. Т. 46. № 3. С. 60–75.
10. Middleton F.A., Strick P.L. Basal ganglia 'projections' to the prefrontal cortex of the primate // Cereb. Cortex. 2002. V. 12. № 9. P. 926–935.
11. Mello G.B., Soares S., Paton J.J. A scalable population code for time in the striatum // Curr. Biol. 2015. V. 25. № 9. P. 1113–1122.
12. Силькис И.Г. Роль дофамин-зависимых перестроек активности в цепях кора - базальные ганглии – таламус – кора в зрительном внимании (гипотетический механизм) // Успехи физиол. наук. 2007. Т. 38. № 4. С. 21–38.

13. Силькис И.Г. Роль базальных ганглиев в обработке сложных звуков и слуховом внимании // *Успехи физиол. наук*. 2015. Т. 46. № 3. С. 76–92.
14. Силькис И.Г. О механизмах взаимозависимого влияния префронтальной коры, гиппокампа и миндалина на функционирование базальных ганглиев и выбор поведения // *Журн. высш. нерв. деят.* 2014. Т. 64. № 1. С. 82–100.
15. Силькис И.Г., Маркевич В.А. Взаимовлияние ацетилхолина, дофамина и ГАМК на функционирование кортико-стрионигральной нейронной сети при болезнях Альцгеймера и Паркинсона (гипотетический механизм) // *Нейрохимия*. 2017. Т. 34. № 1. С. 16–30.
16. Coull J.T., Vidal F., Nazarian B., Macar F. Functional anatomy of the attentional modulation of time estimation // *Science*. 2004. V. 303. № 5663. P. 1506–1508.
17. Allman M.J., Penney T.B., Meck W.H. A brief history of «The psychology of time perception» // *Timing and Time Perception*, 2016. V. 4. № 3. P. 299–314.
18. Lake J.L., LaBar K.S., Meck W.H. Emotional modulation of interval timing and time perception // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2016. V.64. P. 403–420.
19. Yue Z., Gao T., Chen L., Wu J. Odors bias time perception in visual and auditory modalities // *Front. Psychol.* 2016. V. 7. Article 535.
20. Jusyte A., Schneidt A., Schönenberg M. Temporal estimation of threatening stimuli in social anxiety disorder: investigation of the effects of state anxiety and fearfulness // *J. Behav. Theor. Exp. Psychiatry*. 2015. V. 47. P. 25–33.
21. Soares S., Atallah B.V., Paton J.J. Midbrain dopamine neurons control judgment of time // *Science*. 2016. V. 354. № 6317. P. 1273–1277.
22. Lange K.W., Tucha O., Steup A. et al. Subjective time estimation in Parkinson's disease // *J. Neural Transm. Suppl.* 1995. V. 46. P. 433–438.
23. Koch G., Costa A., Brusa L. et al. Impaired reproduction of second but not millisecond time intervals in Parkinson's disease // *Neuropsychologia*. 2008. V. 46. № 5. P. 1305–1313.
24. Berz S., Bättig K., Welzl H. The effects of anticholinergic drugs on delayed time discrimination performance in rats // *Physiol. Behav.* 1992. V. 51. № 3. P. 493–499.
25. Simen P., Balci F., de Souza L. et al. A model of interval timing by neural integration // *J. Neurosci.* 2011. V. 31. № 25. P. 9238–9253.
26. Matell M.S., Meck W.H. Cortico-striatal circuits and interval timing: coincidence detection of oscillatory processes // *Cog. Brain Res.* 2004. V. 21. № 2. P. 139–170.
27. Machado A., Malheiro M.T., Erlhagen W. Learning to time: a perspective // *J. Exp. Anal. Behav.* 2009. V. 92. № 3. P. 423–458.
28. Pariyadath V., Eagleman D. The effect of predictability on subjective duration // *PLoS One*. 2007. V. 2. № 11. P. e1264.
29. Buhusi C.V., Meck W.H. Relative time sharing: New findings and an extension of the resource allocation model of temporal processing // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 2009. V. 364. № 1525. P. 1875–1885.
30. Силькис И.Г. Механизмы влияния дофамина на функционирование базальных ганглиев и выбор движения (сопоставление моделей) // *Нейрохимия*. 2013. Т. 30. № 4. С. 305–313.

**О.П. КУЗНЕЦОВ¹, Л.Ю. ЖИЛЯКОВА¹, В.Е. ДЬЯКОНОВА²,
Д.А. САХАРОВ², Н.И. БАЗЕНКОВ¹, С.Г. КУЛИВЕЦ¹**

¹Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва

²Институт биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН, Москва

olpkuz@yandex.ru

О ДИСКРЕТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МУЛЬТИТРАНСМИТТЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ПРОСТЫХ НЕРВНЫХ СИСТЕМАХ

Описывается дискретная модель мультитрансмиттерных взаимодействий между нейронами в простых нервных системах, имеющих общее внеклеточное пространство (ВКП). Модель характеризуется неоднородностью нейронов (вводятся три типа нейронов, отличающиеся видами активности), эндогенной активностью нейронов некоторых типов, а также широковещательным характером сигналов: трансмиттер, появившийся в ВКП, является входным сигналом для всех нейронов, имеющих рецепторы, чувствительные к этому трансмиттеру.

Ключевые слова: *нейронная сеть, химические взаимодействия, нейротрансмиттеры, эндогенная активность.*

Введение

Основная цель настоящей работы – показать информационную значимость химического состава внеклеточного пространства, которая проявляется в важной роли несинаптических химических взаимодействий при формировании типов электрической активности нейронов и нейромодулирующих эффектах. Эта роль неоднократно была подтверждена на экспериментальном уровне [1–7], однако соответствующие математические модели отсутствуют. Чтобы в явном виде выявить эту значимость, мы предлагаем модель бессинаптического механизма коммуникации между нейронами, использующего только мультитрансмиттерные взаимодействия через внеклеточное пространство (ВКП) (так называемой объемной передачи – volume transmission). Такая коммуникация является широковещательной: трансмиттер, появившийся в ВКП, является входным сигналом для всех нейронов, имеющих рецепторы, чувствительные к этому трансмиттеру. Эта редукция представляет собой сознательную модельную идеализацию, призванную подчеркнуть информационную роль мультитрансмиттерных взаимодействий. Она не отрицает наличия синаптиче-

ских контактов, а рассматривает их как частный случай локальной коммуникации между двумя нейронами, которая в конечном счете также является химической.

Реализация этой цели связана с выбором подходящего математического аппарата. В настоящее время известно множество математических моделей нейронов и нейронных сетей, которые можно разделить на два класса – непрерывные и дискретные модели. Они описывают разные аспекты функционирования реальных нейронов и тем самым дополняют друг друга. В терминах непрерывных моделей можно довольно точно описывать физико-химические свойства и процессы в нейронах и нейронных сетях: прохождение спайков по аксону, процессы в синаптической щели, рост мембранного потенциала и т.д. Однако многие параметры этих описаний несущественны для описания информационных процессов в нервных системах – подобно тому, как для понимания работы компьютера не нужно знать физические процессы, происходящие в его элементах и схемах. Поэтому предлагаемая нами модель дискретна: она учитывает только те параметры, которые существенны для описания информатики нервной системы. К таким параметрам относятся:

- входы и выходы нейронов, нейронных ансамблей, сетей, образованных ансамблями и т.д. (в терминах синапсов и рецепторов);
- структура связей (электрических и химических) между нейронами и ансамблями;
- возможные входные и выходные сигналы (в терминах электрических сигналов и нейротрансмиттеров);
- характер зависимости выходных сигналов от входных (с учетом разных типов нейронов);
- временные последовательности сигналов и описание паттернов в этих терминах;
- наличие памяти у нейронов и ансамблей (в терминах дискретных состояний, меняющихся порогов и весов связей).

Первые два вида параметров (входы, выходы и структура связей) характеризуют структурные (статические) свойства нервных систем. Адекватным языком для их описания является язык теории графов. Остальные параметры характеризуют функциональные (динамические) свойства.

Объект моделирования

В качестве моделируемого объекта будет рассматриваться упрощенный фрагмент нейронной системы: множество нейронов, расположенных в едином внеклеточном пространстве (ВКП), равнодоступном всем ней-

ронам системы. ВКП содержит различные нейротрансмиттеры, которые либо выделяются нейронами этого пространства, либо поступают извне. Нейроны обладают рецепторами, причем каждый рецептор способен реагировать только на один вид трансммиттеров. Реакция рецептора заключается в его действии на потенциал мембраны нейрона: оно может иметь разный знак (возбуждающее либо тормозящее) и разную силу влияния (вес). Нейрон активируется (возбуждается), если сумма реакций рецепторов (с учетом их весов) превосходит пороговое значение, специфическое для каждого нейрона. При этом он выделяет один трансммиттер, специфический для данного нейрона.

Нейроны разнородны; тип нейрона определяется тремя основными характеристиками:

- (1) трансммиттером, который он выделяет (трансммиттер-специфичность);
- (2) множеством рецепторов, которыми он обладает (способностью воспринимать те или иные трансммиттеры и типом реакции на них);
- (3) характером эндогенной активности.

Нейроны одного типа могут отличаться количеством рецепторов, их весами и величиной порога P .

Время дискретно и разделено на такты. Дискретные моменты нумеруются натуральными числами $0, 1, \dots, t, \dots$. Тактом t называется отрезок временной шкалы между моментами t и $t+1$.

По характеру нейронной активности выделяются три типа нейронов.

1. Осциллирующий нейрон (осциллятор) – нейрон, который активируется сам каждые T_i тактов, если его не тормозят, на один такт. Например, при $T_i = 3$ активность осциллятора будет представляться последовательностью: 100100100100...

2. Тонический нейрон – нейрон, имеющий постоянную активность в отсутствии торможения извне: 11111....

3. «Молчащий нейрон» – это классический формальный нейрон. Он активируется, только если его возбудить, и возбуждение превысит порог активации. Возбуждение возможно с задержкой (отложенное возбуждение).

В данной версии модели вводятся дополнительные упрощения:

- как уже отмечалось выше, взаимодействие нейронов происходит посредством нейротрансммиттеров только через ВКП, без участия синапсов. Тем не менее все информационные возможности традиционных «синаптических» моделей в предлагаемой модели сохраняются. При этом в ней возможно и локальное взаимодействие между двумя нейронами: оно возникает в случае, когда только один нейрон выделяет некоторый транс-

миттер и только один (отличный от первого) нейрон имеет соответствующие рецепторы;

- транмиттер, попавший в ВКП, существует в нем ровно один такт;
- уровень концентрации транмиттеров в ВКП не учитывается: считается, что транмиттер либо отсутствует в ВКП, либо его количества достаточно, чтобы на него среагировали все соответствующие рецепторы.

Формальная модель – определения и правила функционирования

Гетерогенная нейронная система определяется как тройка $S = \langle N, X, C \rangle$, где $N = \{N_1, \dots, N_n\}$ – множество нейронов, X – внеклеточное пространство (ВКП); C – множество типов транмиттеров $C = \{c_1, \dots, c_m\}$. Эти типы иногда будем называть цветами. Нейрон $N_i, i = 1, \dots, n$, обладает некоторым множеством рецепторов, которые имеют цвет c_j и вес (силу влияния) – это действительное число. Его знак $s_{ij} \in \{+, -\}$ будем называть знаком рецептора. Он означает, что данный рецептор – либо возбуждающий (плюс-рецептор), либо тормозящий (минус-рецептор). Все рецепторы одного цвета имеют одинаковый знак и собраны в модели в один *слот*. Вес j -го слота w_{ij} равен сумме весов всех рецепторов цвета c_j ; $w_{ij} = 0$ означает, что нейрон N_i не имеет слота цвета c_j .

Все характеристики нейронов гетерогенной нейронной системы можно представить в виде табл. 1. Каждая строка соответствует конкретному нейрону. Первый столбец содержит идентификаторы нейронов, второй – их типы и периоды T_i для осцилляторных нейронов. Третий столбец содержит идентификаторы транмиттеров, которые выбрасывает каждый нейрон. Он представляет собой вектор $D = (d_i)_n$ выходов нейронов и содержит имена транмиттеров: $d_i = c_j$, если i -й нейрон выделяет j -й транмиттер. В последних m столбцах приведена матрица весов W , над каждым столбцом которой показан идентификатор транмиттера: c_1, \dots, c_m .

Таблица 1

Характеристики нейронов

Нейрон	Тип активности	Выход D	Веса слотов W		
			c_1	...	c_m
N_1	Осциллятор, $T = 2$	d_k	w_{11}	...	w_{1m}
...	w_{ij}	...
N_n	Тонический	d_l	w_{n1}	...	w_{nm}

Состояние ВКП в момент t представляется вектором $X(t) = (x_1(t), \dots, x_m(t))$, где $x_i(t)$, $i = 1, \dots, m$, – двоичная переменная, означающая наличие или отсутствие транмиттера c_i в момент t . Правила изменения $X(t)$ во времени являются частью правил функционирования всей системы S , описываемых ниже.

Как уже было отмечено выше, нейронная система S функционирует в дискретном времени. В известных моделях искусственных нейронных сетей нейроны однородны; их активность определяется пороговой функцией активации

$$y_i(t+1) = 1, \text{ если и только если } \sum_{i=1}^k w_i x_i(t) \geq P. \quad (1)$$

В нашей модели нейроны неоднородны, причем нейроны первых двух типов (осциллирующий и тонический) эндогенно активны: они сохраняют активность после снятия возбуждающих воздействий. Для прерывания их активности необходимо торможение, действие которого тоже должно подчиняться пороговому правилу. Это приводит к введению двух порогов для нейрона N_i – порога возбуждения P_{1i} , порога торможения P_{0i} и двух соответствующих функций – функции активации $z_{1i}(t)$ и $z_{0i}(t)$:

$$z_{1i}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{j=1}^m w_{ij} x_j(t-1) \geq P_{1i}; \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

$$z_{0i}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{j=1}^m w_{ij} x_j(t-1) \leq P_{0i}; \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $x_j(t-1)$, $j = 1, \dots, m$, – компоненты вектора $X(t-1)$ (состояния ВКП), которые являются входами функций (2) и (3). При этом для любых i всегда $P_{0i} < 0$, $P_{1i} > 0$, поэтому для некоторых t возможно $z_{1i}(t) = z_{0i}(t) = 0$; напротив, равенство $z_{1i}(t) = z_{0i}(t) = 1$ невозможно ни для каких t .

Нейроны рассматриваются как конечные автоматы, входами которых являются функции $z_{1i}(t)$ и $z_{0i}(t)$. Выход у всех нейронов – один: двоичный выход y ; $y_i(t) = 1$ означает, что нейрон N_i в момент t активен и выделяет транмиттер, указанный на пересечении строки N_i и столбца D табл. 1. Вид конечного автомата определяется типом нейрона.

1. *Осциллятор*. Для осциллятора нужна только функция торможения $z_{0i}(t)$, поскольку активируется он сам. Соответствующий автомат имеет два входных сигнала (два значения $z_{0i}(t)$) и один двоичный выход y . Число состояний равно $T + 1$, где T – длина цикла осцилляции, измеряемая числом

тактов. Таблица переходов автомата приведена на табл. 2. Каждая строка соответствует одному состоянию; ячейки строки задают поведение нейрона в этом состоянии при различных входах: первый элемент ячейки обозначает новое состояние, в которое перейдет нейрон, второй элемент – выход нейрона. Например, последняя строка читается так: если нейрон находится в состоянии s_T , то при сигнале $z_0 = 0$ он перейдет в состояние s_0 и активируется, а при тормозящем сигнале $z_0 = 1$ он останется в состоянии s_T и будет пассивным.

Таблица 2

Таблица переходов для нейрона, осциллирующего с периодом T

Состояние	Вход	
	$z_0 = 0$	$z_0 = 1$
s_0	$s_1, y = 0$	$s_1, y = 0$
s_1	$s_2, y = 0$	$s_2, y = 0$
...		
s_T	$s_0, y = 1$	$s_T, y = 0$

2. *Тонический нейрон* активен постоянно, если его не тормозят. Ему соответствует комбинационный (без памяти) автомат с двумя входными сигналами $z_0 = 0$ и $z_0 = 1$, одним выходом y и одним состоянием: $y(t+1) = \neg z_0(t)$.

3. *Молчащий нейрон*: $y_i(t) = 1$, если нет торможения и есть возбуждение. Ему соответствует комбинационный автомат с одним выходом y и одним состоянием: $y(t+1) = \neg z_0(t)z_1(t)$.

Таким образом, если для традиционного нейрона Маккаллока-Питтса торможение – это всего лишь отсутствие возбуждения, то наличие эндогенной активности в нейронах нашей модели требует ввести торможение как новую сущность, которая имеет свои собственные характеристики: порог торможения P_0 и функцию торможения z_0 .

Вектор $X(t)$ состояния ВКП определяется формулой

$$x_j(t) = \bigvee_{i=1}^n y_i(t)I(d_i = c_j), \quad (4)$$

где $I(d_i = c_j)$ – предикат, равный 1, если равенство $d_i = c_j$ истинно, и 0, если оно ложно. Формула (4) предполагает, что поступления транзиттеров в ВКП отсутствуют. В противном случае значение $x_j(t)$ формируется с учетом этих поступлений.

Обсуждение

В наших предыдущих публикациях [8, 9] были изложены основные принципы дискретного моделирования мультитрансмиттерных взаимодействий в нервных системах. В данной работе предлагается конкретная модель, реализующая эти принципы. Эта модель еще недостаточно близка к нейробиологической реальности: она не учитывает уровень концентрации трансмиттеров и их время жизни в ВКП, асинхронный характер нейронных взаимодействий, динамику мембранного потенциала и т.д. Однако уже в таком виде данная модель обладает большей выразительной силой, чем «проволочные» модели, основанные на локальных синаптических связях между однородными формальными нейронами. Основные особенности предложенной модели заключаются в следующем:

- Расширенный алфавит сигналов: вместо бинарного алфавита синаптических моделей данная модель предлагает многозначный алфавит нейротрансмиттеров. Благодаря расширенному алфавиту нейронная сеть является более «информационноёмкой»: для реализации заданного паттерна поведения ей может понадобиться меньше нейронов, чем сети, использующей только синаптические связи.

- Наличие разных типов нейронов, включая нейроны с эндогенной активностью.

- Широковещательность и дистантность нейротрансмиттерных сигналов: такой сигнал воспринимается всеми нейронами, присутствующими в ВКП.

Последние две особенности принципиально важны для объяснения и моделирования процессов самоорганизации, возникающих в искусственно созданных популяциях отдельных нейронов. В недавней работе [10] описаны процессы в искусственных ансамблях («циркутоидах»), созданных из отдельных нейронов различных фенотипов, отличающихся как типом электрической активности, так и выделяемым нейротрансмиттером. Показано, что такие циркутоиды способны к генерации эндогенной ритмической активности, причем характер этой активности существенно зависит от соотношения различных фенотипов в популяции. Очевидно, что инициация процесса, выходящего на генерацию ритма, невозможна без наличия нейронов с эндогенной активностью, а коммуникация между нейронами, первоначально не имеющими синаптических связей, может быть объяснена только их химическими взаимодействиями.

Заключение

Более подробное описание предложенной модели, содержащее ее биологические основания, обзор существующих моделей нейронных сетей и примеры, иллюстрирующие модель, будет опубликовано в журнале «Искусственный интеллект и принятие решений». В настоящее время разрабатывается расширенная модель и ее программная реализация. В ней будет учтено влияние концентрации нейротрансмиттеров в ВКП, динамика мембранного потенциала, а также конкуренция нейронов в ситуациях взаимного торможения.

Список литературы

1. Bloom F.E. 1984. The functional significance of neurotransmitter diversity. // *Am. J. Physiol.* V. 246. P. 184–94.
2. Getting P. 1989. Emerging principles governing the operation of neural networks. // *Annu. Rev. Neurosci.* V. 12. P. 185–204.
3. Сахаров Д.А. Множественность нейротрансмиттеров: функциональное значение // *Журн. эволюц. биохимии и физиологии.* 1990. Т. 26. № 5. С. 733–741.
4. Brezina V. 2010. Beyond the wiring diagram: signalling through complex neuromodulator networks. // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 12; 365(1551):2363–2374.
5. Bargmann C.I. Beyond the connectome: How neuromodulators shape neural circuits. // *BioEssays.* 2012. 34(6):458–465.
6. Дьяконова В.Е., 2012. Нейротрансмиттерные механизмы контекст-зависимого поведения // *Журнал высшей нервной деятельности.* 2012. Т. 62. № 6. С. 1–17.
7. Moroz L.L., Kohn A.B. Independent origins of neurons and synapses: insights from ctenophores. // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 2016. Vol. 371 (issue 1685).
8. Жилиякова Л.Ю. Новый подход к моделированию формальных нейронов и их взаимодействий // *Материалы VI международной научно-технической конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем OSTIS-2016».* Минск: БГУИР, 2016.
9. Жилиякова Л.Ю., Кузнецов О.П. Принципы дискретного моделирования гетерохимических механизмов в нервных системах // *XVIII Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2016»: Сборник научных трудов.* В 3-х ч. Ч. 3. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 82–90.
10. Sternfeld MJ, Hinckley CA, Moore NJ, Pankratz MT, Hilde KL, Driscoll SP, Hayashi M, Amin ND, Bonanomi D, Gifford WD, Sharma K, Goulding M, Pfaff SL. // *Speed and segmentation control mechanisms characterized in rhythmically-active circuits created from spinal neurons produced from genetically-tagged embryonic stem cells.* *Elife.* 2017 Feb 14;6. pii: e21540. doi: 10.7554/eLife.21540.

Я.Б. КАЗАНОВИЧ¹, О. БУРИЛКО², Р.М. БОРИСЮК^{1,3}

¹Институт математических проблем биологии РАН – филиал Государственного федерального учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской Академии наук», Пушкино

²Институт математики Национальной Академии Наук Украины, Киев

³Department of Computing and Mathematics, University of Plymouth, UK

ПОБЕДИТЕЛЬ ПОЛУЧАЕТ ВСЕ В СЕТИ ФАЗОВЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

Рассматривается сеть обобщенных фазовых осцилляторов с центральным элементом. Показано, что в этой сети может быть реализована процедура «победитель получает все» в терминах конкуренции периферических осцилляторов за синхронизацию с центральным осциллятором. Приводятся результаты имитационного моделирования, демонстрирующие функционирование процедуры при разных значениях параметров системы. Описывается использование процедуры для реализации осцилляторной модели зрительного поиска.

Ключевые слова: *фазовые осцилляторы, победитель получает все, зрительный поиск, синхронизация.*

Введение

Победитель получает все (ППВ) является вычислительным принципом, используемым в искусственных нейронных сетях для реализации таких функций, как конкурентное обучение, принятие решений и выбор действия [1]. В соответствии с ППВ нейроны в нейронной сети конкурируют друг с другом за активацию. Обычно один нейрон с наибольшим внешним возбуждением оказывается победителем в этой конкуренции. Активность других нейронов подавляется. ППВ играет важную роль в иерархических моделях зрения [2] и в моделях селективного внимания [3–5].

Традиционно ППВ-системы строятся из искусственных пороговых нейронов или импульсных нейронов. В данной работе предлагается альтернативный подход, основанный на синхронизации активности в осцилляторной сети с центральным элементом. Рассматривается сеть из осцилляторов с радиальной архитектурой связей. В такой сети центральный осциллятор (ЦО) соединен с так называемыми периферическими осцилляторами (ПО) с помощью прямых и обратных связей. Мы покажем, что при подходящем выборе функций взаимодействия осцилляторов и параметров

сети можно организовать соревнование между ПО за синхронизацию с ЦО таким образом, что только один ПО окажется победителем. Этот ПО будет работать синфазно с ЦО, в то время как другие ПО будут асинхронны по отношению к ЦО. Результатом такого взаимодействия будет резонансное возрастание активности «победившего» ПО, а активность «проигравших» ПО будет подавлена до низкого уровня.

В качестве осцилляторов в рассматриваемой сети используются обобщенные фазовые осцилляторы. Традиционные фазовые осцилляторы Курамото описываются одной переменной, фазой колебаний. Собственные частоты и величины связей являются параметрами системы. В случае обобщенных осцилляторов эти параметры превращаются в динамические переменные.

В следующих разделах будет дано описание сети, условий реализации ППВ и приведен пример использования осцилляторного варианта ППВ для моделирования зрительного поиска.

1. Конструкция сети

Динамика системы для реализации ППВ описывается следующими уравнениями:

$$\frac{d\theta_0}{dt} = \omega_0 + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j f(\theta_j - \theta_0), \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + b g(\theta_0 - \theta_i), \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_0}{dt} = \frac{\alpha}{n} \sum_{j=1}^n a_j f(\theta_j - \theta_0), \quad (3)$$

$$\frac{da_i}{dt} = \beta(-a_i + c + \gamma h(\theta_i - \theta_0)), \quad (4)$$

где $(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n) \in T^{n+1}$ - фазовые переменные на $(n+1)$ -мерном торе ($\theta_i \in (-\pi, \pi]$), ω_i - собственные частоты осцилляторов, a_i, b - силы связей между осцилляторами. Переменные a_i мы будем также интерпретировать как амплитуды колебаний ПО. Положительные значения связей соответствуют синхронизирующему взаимодействию, отрицательные – десинхронизирующему. Мы будем полагать $a_i > 0$, $b < 0$, поскольку теоретическое исследование системы (1)-(4) показывает, что эти условия обеспечивают устойчивость режима ППВ [6]. Во всех численных экспериментах, описы-

ваемых далее, мы полагаем $b = -1$. Величины $\alpha, \beta, \gamma, c > 0$ являются параметрами.

Функции, входящие в уравнения (1)–(4) задаются следующими формулами:

$$f(x) = \begin{cases} \sin\left(\frac{|x - \pi|^v}{\pi^{v-1}}\right), & 0 < x \leq \pi, \\ -\sin\left(\frac{|x + \pi|^v}{\pi^{v-1}}\right), & -\pi < x \leq 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$g(x) = \sin(x),$$

$$h(x) = \begin{cases} (1 - x^2)^\sigma, & |x| \leq 1, \\ 0, & 1 < |x| \leq \pi \end{cases} \quad (6)$$

с параметрами $v > 1, \sigma \gg 1$. Примеры функций f и h приведены на рис. 1. Параметр v управляет положением экстремумов $f(x)$, а параметр σ задает ширину функции $h(x)$.

Уравнения (1)–(4) являются обобщением стандартных уравнений для фазовых осцилляторов Курамото, к которым добавлено уравнение для адаптации собственной частоты ЦО ω_0 и уравнения адаптации амплитуд ПО a_i . Смысл уравнения (3) становится понятным, если его переписать в виде

$$\frac{d\omega_0}{dt} = \alpha \left(\frac{d\theta_0}{dt} - \omega_0 \right). \quad (7)$$

В соответствии с уравнением (7) собственная частота ЦО адаптируется в сторону его текущей частоты. Параметр α задает скорость адаптации.

Смысл уравнения (4) состоит в том, что если ПО работает синфазно с ЦО, его амплитуда возрастает до уровня $c + \gamma$, в противном случае амплитуда ПО падает до уровня c . Параметр β задает скорость адаптации амплитуд.

2. Результаты имитационного моделирования

Проиллюстрируем различные типы динамики в системе (1)–(6) при реализации режима ППВ. Для этого присвоим амплитуде a_1 первого ПО начальное значение большее, чем начальные амплитуды остальных ПО. Ожидается, что в этом случае первый ПО будет иметь больший шанс вы-

играть конкуренцию за синхронизацию с ЦО, чем другие ПО. В численных расчетах мы полагали $4 \leq a_1(0) \leq 12$, в то время как начальные значения амплитуд других ПО были $a_i(0) = 2$, $i \neq 1$. В течение одного прогона симуляции амплитуды ПО меняются в соответствии с (4). Значения других параметров $c = 2$, $\gamma = 10$. Это означает, что амплитуды осцилляторов будут асимптотически находиться в пределах $(c, c + \gamma)$.

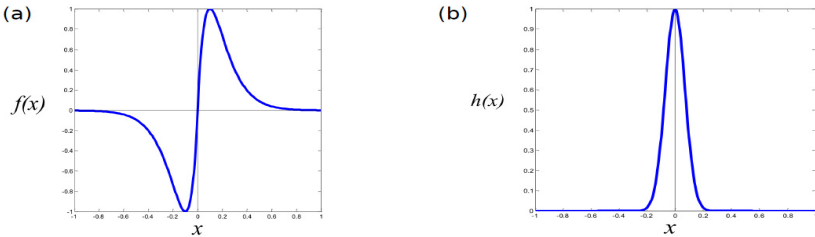


Рис. 1. Функция взаимодействия $f(x)$, $\nu = 20$ (а), функция управления резонансом $h(x)$, $\sigma = 100$ (б)

Различие в динамике ПО проявляет себя в том, к какой из границ, верхней $c + \gamma$ или нижней c стремится траектория амплитуды. Прежде, чем проверять это, необходимо, чтобы прошло некоторое время для того, чтобы динамика ПО установилась. Мы положили это время равным $T_1 = 80$. Следующие 20 единиц времени предназначены для выявления типа динамики. Таким образом, полное время одного прогона симуляции равно $T_2 = 100$. Мы ввели два порога: $H_{high} = 10$ и $H_{low} = 3$. Если в течение временного периода (T_1, T_2) траектория $a_i(t)$ лежит выше H_{high} , то i -й ПО считается победителем.

Стохастичность в систему вносится путем выбора случайных значений собственных частот ПО. Они равномерно распределены в заданном интервале $(4,9; 5,1)$. Начальное значение собственной частоты ЦО равно 5. Начальные значения фаз всех осцилляторов равны 0.

Многочисленные компьютерные эксперименты показали, что наблюдаются три типа динамики:

А. $a_1(t) > H_{high}$ для всех моментов времени $T_1 < t \leq T_2$, причем первый ПО является единственным ПО, для которого это неравенство выполняется. Это означает, что первый ПО является единственным победителем конкуренции за синхронизацию с ЦО.

В. $a_i(t) > H_{high}$ для $T_1 < t \leq T_2$ и единственного значения индекса $i \neq 1$. Это означает, что первый ПО проиграл соревнование за синхронизацию с ЦО, несмотря на начальное преимущество во влиянии на ЦО.

С. $a_i(t) < H_{low}$ для $T_1 < t \leq T_2$ и всех значений индекса $i = 1, \dots, n$. Это случай, когда соревнование между ПО за синхронизацию с ЦО не выявило победителя. Ни один из ПО не смог устойчиво синхронизоваться с ЦО за отведенное время.

Важно отметить, что вычисления не выявили случаев, когда бы победителей было больше, чем один (в случае устойчивой стационарной динамики этот факт можно доказать аналитически). Кроме того, при выбранных параметрах хаотическая динамика отсутствует.

В каждом из следующих примеров было осуществлено по 1000 прогонов симуляции системы. В каждом из них устанавливался тип динамики (А), (В) или (С). Результаты вычислений приведены на рис. 2–4 в виде гистограмм, в которых высота столбцов показывает количество реализаций каждого из указанных типов динамики.

Пример 1. В этом примере варьируются начальные значения амплитуды первого ПО: амплитудам $a_1(0)$ последовательно присваиваются значения 4, 6, 8, 10, 12. Естественно ожидать, что чем выше значение $a_1(0)$, тем больше вероятность того, что первый ПО окажется победителем конкуренции. Это ожидание подтверждается рис. 2. Вероятность того, что первый ПО выиграет конкуренцию, возрастает с 34,1 % для $a_1(0) = 4$ до 91,8 % для $a_1(0) = 12$. Соответственно, вероятность того, что какой-то другой ПО выиграет конкуренцию, падает с 60,3 до 7,7 %. Вероятность того, что исходом соревнования будет случай (С), мала и убывает с возрастанием $a_1(0)$.

Пример 2. В данном примере варьируется значения параметра v – крутизны в точке 0 функции взаимодействия f из уравнения (1). В этом и следующем примерах начальное значение амплитуды первого ПО $a_1(0) = 8$. Результаты, представленные на рис. 2, показывают, что увеличение v способствует небольшому увеличению вероятности того, что первый ПО окажется победителем соревнования. Более существенным фактом является убывание вероятности реализации случая (С) с ростом v .

Пример 3. Этот пример показывает, что скорость адаптации амплитуд ПО является существенным фактором, влияющим на реализацию ППВ. Наилучшие результаты получаются в случае, когда значение β мало. Это является следствием того факта, что для успешного функционирования ППВ нужно, чтобы процесс фазовой синхронизации происходил бы быстрее, чем процесс адаптации амплитуд.

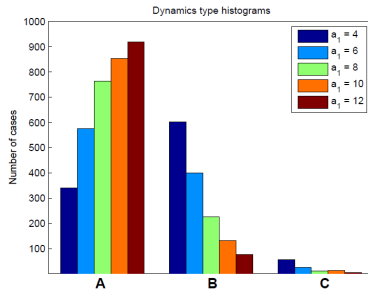


Рис. 2. Число исходов конкуренции (А), (В), (С) для разных начальных значений величины связи a_1 (пример 1)

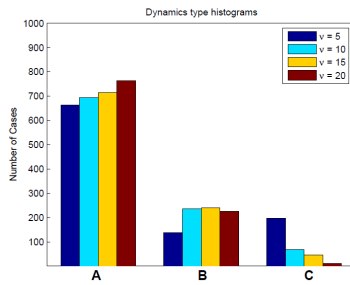


Рис. 3. Число исходов конкуренции (А), (В), (С) для разных значений ν крутизны функции f в точке 0 (пример 2)

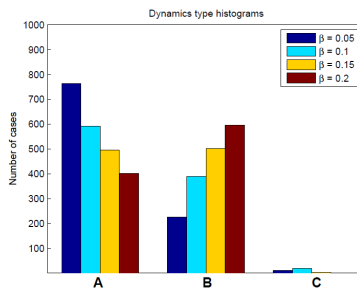


Рис. 4. Число исходов конкуренции (А), (В), (С) для разных значений скорости адаптации амплитуд β (пример 3)

3. Модель зрительно поиска

Зрительный поиск заключается в обнаружении на изображении целевого объекта, расположенного среди других объектов, отвлекающих внимание (дистракторов) (рис. 5). Задача зрительного поиска может быть разной степени сложности в зависимости от заметности целевого объекта на фоне дистракторов [7, 8]. В простых задачах среднее время реакции T наблюдателя не зависит от числа объектов n на изображении. В более сложных задачах T растет с ростом n тем быстрее, чем труднее задача, причем зависимость $T(n)$ хорошо описывается линейной функцией [9–11].

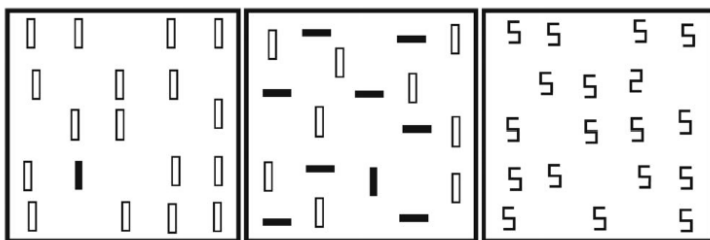


Рис. 5. Три задачи зрительного поиска разной степени сложности.

На рисунке черный цвет прямоугольников соответствует красному в реальности, а белый цвет соответствует зеленому. Целевой объект в левом окне – красный прямоугольник, целевой объект в среднем окне – красный вертикальный прямоугольник, целевой объект в правом окне – цифра 2 [11]

Согласно одной из теорий зрительного поиска (Guided Search, GS) [9], процесс обнаружения целевого объекта состоит из нескольких попыток. При каждой попытке внимание случайным образом фокусируется на одном из объектов на изображении. Если этот объект целевой, то поиск прекращается. Если в фокусе внимания оказывается дистрактор, делается повторный поиск. Такие попытки продолжаются до тех пор, пока не будет обнаружен целевой объект или не истечет время, интуитивно отведенной испытуемым на поиск. В каждой попытке поиска вероятность выбора целевого объекта тем выше, чем выше его заметность на фоне дистракторов. Если заметность целевого объекта велика, то практически всегда бывает достаточно одной попытки для обнаружения целевого объекта. В этом случае время поиска почти не будет зависеть от числа объектов на изображении. Если же целевой объект плохо заметен на фоне дистракторов, число попыток, необходимых для его обнаружения, растет с ростом n .

Мы применили GS в рамках модели внимания, описываемой системой (1)–(6) [12]. В нашей модели предполагается, что каждый зрительный объект кодируется в мозге осциллятором, работающим на частоте гамма-ритма. В модели эту роль играют ПО. ЦО играет роль центрального исполнительного элемента системы внимания. Постулируется, что в фокус внимания выбирается тот объект, который кодируется ПО, работающим синхронно с ЦО. Заметность объекта описывается начальным значением амплитуды ПО, соответствующего этому объекту. В численных экспериментах были использованы значения $a_1(0) = 4, 6, 8, 10, 12$ для целевого объекта и $a_i(0) = 2, i \neq 1$, для дистракторов.

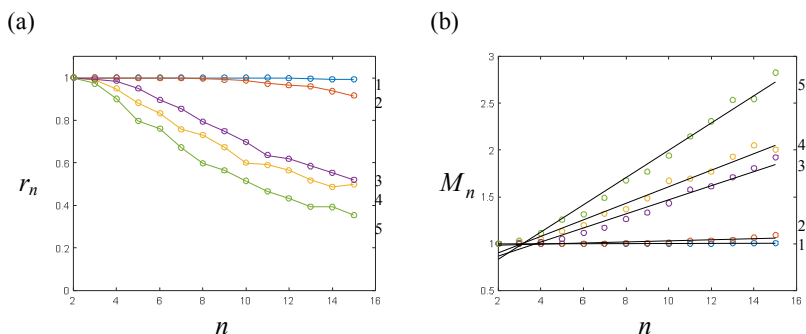


Рис. 6. Численное моделирование зрительного поиска при различном числе объектов на изображении n : (а) вероятность выбора целевого объекта за одну попытку выбора; (б) среднее число попыток, необходимых для выбора целевого объекта (прямыми линиями показаны линии линейной регрессии, аппроксимирующие численные данные). Линии, обозначенные номерами 1, 2, 3, 4, 5, соответствуют значениям $a_1(0) = 4, 6, 8, 10, 12, a_2(0) = 2$

На рис. 6, а показаны вероятности r_n выбора целевого объекта за одну попытку на изображении, содержащем n объектов. На рис. 6, б показаны величины среднего числа попыток M_n , необходимых для выбора целевого объекта, аналитически рассчитанные на основе значений r_n . Линии 1 и 2 почти параллельны оси абсцисс. Это соответствует простой задаче поиска (например, поиску по одному хорошо различаемому признаку, как в левом окне рис. 5). Линии 3 и 4 соответствуют задаче поиска средней сложности (например, когда целевой объект отличается от дистракторов по одному из двух возможных признаков, т.е. поиск идет по комбинации двух признаков, как в среднем окне рис. 5). Линия 5 соответствует задаче высокой сложности (например, когда целевой объект отличается от дистракторов своей геометрией, как в правом окне на рис. 5).

Заключение

Полученные результаты показывают, что система фазовых осцилляторов (1)–(6) может реализовывать процедуру ППВ в терминах синхронизации ПО с ЦО. Успех в реализации ППВ зависит от параметров системы. Лучшие результаты получаются при выборе функции взаимодействия (5) с достаточно высокой крутизной в точке 0. Скорость адаптации амплитуд ПО в уравнении (4) должны быть медленнее по сравнению со скоростью фазовой синхронизации между ЦО и ПО в уравнениях (1)–(2).

Моделирование зрительного поиска с помощью модели внимания, основанной на системе (1)–(6), хорошо соответствует экспериментальным данным для задач разной степени сложности. Отметим также, что модель демонстрирует линейные зависимости M_n от n . Нетрудно показать, что это приводит к линейной зависимости среднего времени реакции T от n , наблюдаемой в психофизических экспериментах.

Список литературы

1. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
2. Riesenhuber M., Poggio, T. Hierarchical models of object recognition in cortex // *Nature Neuroscience*. 1999. V. 2. P. 1019–1025.
3. Itti L., Koch C., Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis // *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1998. V. 20. P. 1254–1259.
4. Standage D.S., Trappenberg T.P., Klein R.M. Modelling divided visual attention with a winner-take-all network // *Neural Networks*. 2005. V. 18. P. 620–627.
5. Borji A., Itti L. State-of-the-art in visual attention modeling // *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2013. V. 35. P. 185–207.
6. Burylko O., Kazanovich Y.B., Borisyuk R.M. Winner-take-all in an oscillator system with adaptation (готовится к публикации).
7. Treisman A.M., Gelade G. A feature-integration theory of attention // *Cognitive Psychol.* 1980. V. 12. P. 97–136.
8. Treisman A., Sato S. Conjunction search revisited // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 1990. V. 16. P. 459–478.
9. Wolfe J.M. Guided Search 4.0: Current progress with a model of visual search // In Gray, W. (Ed.) *Integrated Models of Cognitive Systems* (p. 99–119). University Press, New York: Oxford, 2007.
10. Hulleman J. Inhibitory tagging in visual search: Only in difficult search are items tagged individually // *Vision Res.* 2010. V. 50. P. 2069–2079.
11. Palmer E.M., Horowitz T.S., Torralba A., Wolfe J.M. What Are the Shapes of Response Time Distributions in Visual Search? // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 2011. V. 37 P. 58–71.
12. Kazanovich Y., Borisyuk R. Reaction times in visual search can be explained by a simple model of neural synchronization // *Neural Networks*. 2017. V. 87. P. 1–7.

Секция 5

Нейросетевые системы обработки данных, распознавания образов и управления

Е.Е. МАРУШКО, А.А. ДУДКИН

Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск
marushko@lsi.bas-net.by, doudkin@newman.bas-net.by

ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассматривается задача прогнозирования многомерных временных рядов телеметрической информации космического аппарата. Приводится подход для долгосрочного прогноза телеметрических параметров системы энергоснабжения космических аппаратов с помощью ансамблей нейронных сетей.

Ключевые слова: ансамбль нейронных сетей, многомерный временной ряд, телеметрическая информация, прогнозирование, обучение.

Введение

Космическая телеметрия – это совокупность технологий, позволяющая производить дистанционный (удаленный) сбор информации о состоянии бортовых подсистем космических аппаратов. Их функционирование контролируется путем анализа показаний датчиков, которые распределены по модулям подсистем, таким образом, телеметрия представляет собой многомерный временной ряд. Одной из задач анализа является прогнозирование данного ряда [1].

В работе рассматривается задача прогнозирования параметров системы электроснабжения (СЭС) космических аппаратов с использованием ансамблей нейронных сетей по поступившей телеметрической информации (ТМИ).

В состав СЭС входят: модуль регулирования и распределения мощности; батарея солнечная (БС); литий-ионная аккумуляторная батарея (АБ).

БС со временем деградируют под действием следующих факторов: метеорная эрозия, уменьшающая оптические свойства поверхности фотоэлектрических преобразователей; радиационное излучение, особенно при

солнечных вспышках и при полёте в радиационном поясе Земли; термические удары из-за охлаждения конструкции на затенённых участках орбиты и нагрева на освещённых и наоборот. Литий-ионные АБ неизбежно начинают стареть с момента их производства. Происходит это из-за деградации силовых модулей в аккумуляторе как из-за присутствующих химических процессов, так и под воздействием постоянных циклов перезарядки. Скорость деградации зависит не только от внешних факторов, но и от режимов эксплуатации. Вышеперечисленное означает, что время эффективной работы СЭС ограничено и прогноз состояния позволяет проводить мониторинг и увеличивать ресурс системы [2].

Состояние СЭС описывается набором телеметрических данных: токи заряда и разряда батарей, напряжения батарей, напряжение шины питания и электрические параметры различных компонент системы. Данный набор представляет собой многомерный временной ряд, а прогнозирование состояний СЭС сводится к решению задачи прогнозирования данного многомерного ряда или отдельных рядов.

Задача прогнозирования временного ряда в общем виде формулируется следующим образом [3, 4]: по известному текущему значению последовательности $y(k)$ и некоторой предыстории $y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-m)$ дать оценку следующего значения $\hat{y}(k+1)$. Каждый элемент последовательности $y(k)$ представляет собой набор значений в момент k . Длина предыстории m , которая используется для прогнозирования, называется временным окном.

Широкое распространение для решения задач прогнозирования находит нейросетевой подход, так как он позволяет моделировать зависимости между данными в результате обучения на примерах. При этом эффективность использования нейронных сетей (НС) зависит от архитектурных решений и методов обучения [3, 5], что приводит к необходимости многократного проведения экспериментов.

В данной работе исследуется возможность долгосрочного прогноза телеметрических параметров с использованием ансамблей нейронных сетей (АНС) [6, 7], т.е. набора НС, принимающего решения путем усреднения результатов работы отдельных НС.

В прогнозном анализе и машинном обучении имеет место дрейф, означающий, что статистические свойства целевой переменной, которую модель пытается предсказать, меняются с течением времени непредсказуемым образом [8], что увеличивает ошибку прогнозирования. Отсюда эффективность нейросетевой модели прогнозирования может быть повышена при помощи методов итерационного обучения АНС [6, 8, 9]. Эти методы подразумевают оценку точности всех моделей и их ранжирование

по точности на каждой итерации анализа. При понижении суммарной точности АНС детектирует дрейф целевой переменной, и производится добавление в ансамбль нового элемента, обученного на релевантных данных. При таком подходе сохраняется модель, заложенная при начальном обучении, и вносятся новые параметры без проблемы «забывания». Таким образом, реализуется дообучение АНС.

Организация вычислительного эксперимента

Выборка – конечный набор прецедентов, некоторым способом выбранных из множества всех возможных прецедентов, называемого *генеральной совокупностью*.

Набор данных, на которых проводился анализ, представляет собой телеметрические данные, формируемые датчиками СЭС белорусского космического аппарата и характеризующей функционирование данной подсистемы. Значения, выдаваемые датчиками контролируемых параметров, зависят от режима работы СЭС, который в свою очередь задается командами управления, передаваемыми с Земли. Значения датчиков СЭС коррелируют между собой, что позволяет рассчитывать на удовлетворительные оценки прогноза.

Опрос датчиков на борту производится каждые 0,1 с. Но формирование долгосрочного прогноза в данном масштабе представляется крайне сложной задачей, поэтому было предложено для реализации долгосрочного прогнозирования вычислять интервальные оценочные параметры ТМИ каждого датчика. Были определены следующие параметры:

- минимальное значение на интервале;
- максимальное значение на интервале;
- среднее значение на интервале.

Интервал вычисления параметра равен 24 ч.

Эксперимент проводился с использованием ТМИ СЭС за период с 2012 по 2017 г. Набор данных представляет собой 1569 отсчетов, каждый содержит 145 параметров. Построение НС выполнялось для отдельных датчиков. Прогноз вычислялся для значения через 30 дней.

Так как обучение выполняется с учителем, то необходимо сформировать обучающую выборку из пар «входной вектор, выходной вектор». Формирование пары обучающих примеров осуществляется по принципу скользящего окна [4]: т.е. берется некоторый отрезок временного ряда и из него выделяется несколько наблюдений, которые и будут представлять собой входной вектор. Значением желаемого выхода в обучающем примере будет следующее по порядку наблюдение. Затем окно сдвигается на

одну позицию в направлении возрастания времени, и процесс формирования следующей пары обучающей выборки повторяется.

При подготовке ТМИ для обучения НС выполняется масштабирование. Масштабирование необходимо, чтобы привести данные в допустимый диапазон $[-1, 1]$. Выходы сети также масштабируются.

Целью эксперимента является определение оптимальных гиперпараметров АНС: размер скрытого слоя, временное окно прогнозирования.

В качестве базового элемента АНС используется многослойный персептрон с одним скрытым слоем с нелинейной функцией активации *гиперболический тангенс*. Обучение одиночной НС осуществляется алгоритмом RPROP [10].

В предлагаемой модели выходное значение АНС формируется как взвешенная сумма выходов отдельных НС, в предыдущей работе [11] была показана их сравнительная эффективность. АНС включает 20 базовых элементов.

Для оценки качества обученных НС и АНС используются следующие величины:

- средний квадрат ошибки (mean square error, MSE);
- средняя абсолютная ошибка в процентах (mean absolute percentage error, MAPE).

Для оценки точности использовалась 8-кратная перекрестная проверка. Для этого общая обучающая выборка разделялась 8 равных частей (12,5 % от общего набора), и обучение повторялось 8 раз для каждой пары параметров, при этом каждая из 8-ми частей последовательно назначалась тестовой выборкой, а оставшаяся часть данных использовалась для обучения с ранним остановом, для этого делилась на валидационную (10 %) и обучающую (90 %) выборки случайным образом.

Для поиска гиперпараметров использовался сеточный поиск [12].

Оценка гиперпараметров НС

Сеточный поиск предполагает задание наборов всех параметров, в области которых производится поиск. Набор данных ограничен по размеру, отсюда следует, что сложные НС (с большим количеством настраиваемых параметров) не будут достаточно обучены, и поиск гиперпараметров стоит вести в области с малыми размерами входного и скрытого слоя. Были выбраны следующие диапазоны: размер окна прогнозирования от 8 до 120 дней, размер скрытого слоя от 8 до 120 нейронов.

Поиск проводился по следующему алгоритму.

- 1) Выбор пары параметров из области поиска.

2) Формирование тестовой и обучающей выборки для 8-кратной перекрестной проверки.

3) Обучение с ранним остановом 20 НС с размером скрытого слоя, равным текущему на интервале.

4) Формирование из 20 НС взвешенного АНС.

5) Вычисление MAPE ошибки.

6) Выбор следующей тестовой выборки и формирование обучающей выборки.

7) Если не закончена 8-кратная перекрестная проверка, то переход на п. 3.

8) Пока не конец области поиска, переход к следующей паре параметров.

9) Выбор АНС с наименьшей ошибкой на интервале поиска, размер скрытого слоя элемента АНС и размер временного окна прогнозирования будут подходящим решением.

На рис. 1 приведена область поиска с полученными значениями ошибки.

Как видно, наименьшая ошибка получена при размере временного окна прогнозирования равном 56 дней, и размере скрытого слоя 48 нейронов.

На рис. 2 приведены графики среднесуточного значения реальной ТМИ и прогноза для параметра «напряжение батареи» СЭС.

В табл. 1 представлены оценки ошибок MSE и MAPE для параметра «напряжение батареи» без масштабирования значений.

Были также рассчитаны значения MAPE ошибки для других типов датчиков. Для тока заряда АБ ошибка MAPE составляет 4,1712, тока разряда АБ – 5,9721, для напряжения шины питания – 0,1968. Разница в значении MAPE для токов и напряжений вытекает из того, что токи в данном случае измеряются в мА и изменяются в пределах нескольких сотен, а напряжения измеряются в В и изменяются в пределах 3–4 В.

Таблица 1

Оценка для параметра «напряжение батареи»

Прогнозируемый параметр	MSE	MAPE
Минимальное значение	0,2925	0,4938
Максимальное значение	0,0152	0,1485
Среднее значение	0,0525	0,2280

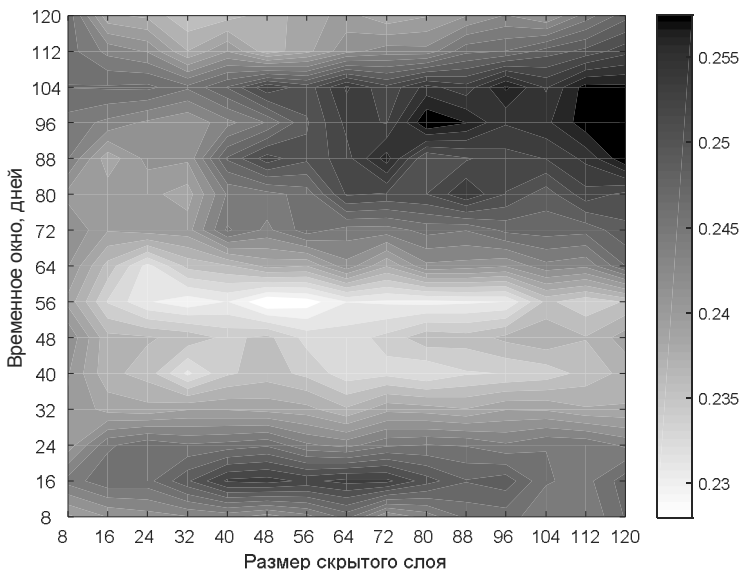


Рис. 1. Сеточный поиск гиперпараметров АНС, MAPE

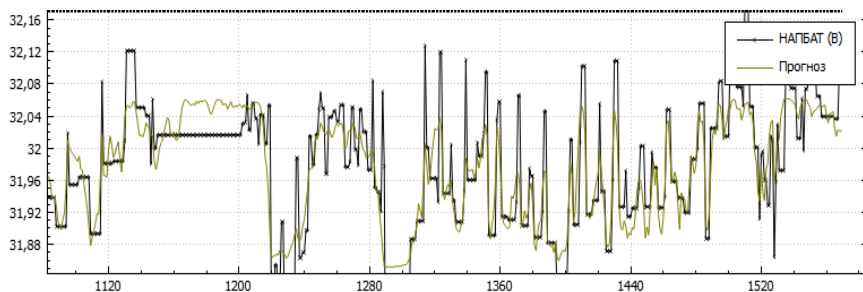


Рис. 2. Реальная ТМИ напряжения батареи и прогноз

Заключение

Эксперимент показал, что для указанных условий долгосрочного прогнозирования телеметрических параметров минимальная ошибка получена при размере временного окна прогнозирования равном 56 дней, и размере скрытого слоя 48 нейронов.

Для найденных гиперпараметров средняя абсолютная ошибка в процентах среднего значения на интервале при прогнозировании ТМИ, формируемой датчиками СЭС, для напряжения АБ составляет 0,2280, для напряжения шины питания 0,1968, для тока заряда АБ 4,1712.

Нейросетевая модель на основе взвешенных АНС предоставляет интеллектуальный инструмент решения задач прогнозирования ТМИ для разрабатываемого в ОИПИ НАН Беларуси совместно с центром управления полетами БКА экспериментального образца нейросетевой системы мониторинга состояния подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным.

Список литературы

1. Нейросетевая система мониторинга состояния и поведения подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным для наземного командно-измерительного комплекса / А.А. Дудкин [и др.] // Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (Москва, 15 мая 2014 г.). М.: ВНИИЭМ, 2014. С. 194–204.
2. Азарнов А.Л. Исследование факторов, оказывающих влияние на деградацию литий-ионных аккумуляторов / А.Л. Азарнов [и др.] // ISSN 1727-7337. Авиационно-космическая техника и технология. 2016. № 4 (131). ISSN: 1727-7337. С. 10–17.
3. Short-Term Load and Wind Power Forecasting Using Neural Network-Based Prediction Intervals / Hao Quan [et al.] // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. Short-Term Load and Wind Power Forecasting Using Neural Network-Based Prediction Intervals. 2013. Vol. 25. Iss. 2. ISSN: 2162-237X. P. 303–315.
4. Лысяк А.С. Прогнозирование многомерных временных рядов / А.С. Лысяк, Б.Я. Рябко // Вестник СибГУТИ. 2014. № 4. С. 75–88.
5. Comparison of the ARMA, ARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez dam reservoir / M. Valipour [et al.] // Journal of Hydrology 476 (2013). P. 433–441.
6. Marushko Y. Using Ensembles of Neural Networks with Different Scales of Input Data for the Analysis of Telemetry Data / Y. Marushko // Proc. of the XV Intern. PhD Workshop OWD 2013 (Wisla, 19–22 Oct. 2013). Gliwice: Silesian University of Technology, 2013. P. 386–391.
7. Neural network ensemble operators for time series forecasting / Nikolaos Kourentzes [et al.] // Expert Systems with Applications. July 2014. Vol.41. Iss. 9. ISSN: 0957-4174. P. 4235–4244.
8. Elwell, R. Incremental Learning of Variable Rate Concept Drift / R. Elwell, R. Polikar // MCS. Vol. 5519 of Lecture Notes in Computer Science. 2009. P. 142–151.
9. Parikh D. An ensemble-based incremental learning approach to data fusion / D. Parikh, R. Polikar // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part B: Cybernetics. 2007. Vol. 37. № 2. P. 437–450.

10. Riedmiller M. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm / M. Riedmiller, H. Braun // In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN), San Francisco. 1993. P. 586–591.

11. Дудкин А.А. Исследование эффективности ансамблей нейронных сетей для прогнозирования временных рядов телеметрии космических аппаратов / А.А. Дудкин, Е.Е. Марушко // Материалы международной научно-технической конференции «Нейроинформатика-2016». Россия. Москва, 25–29 апреля 2016 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 162–172.

12. Bengio, Yoshua. Random Search for Hyper-Parameter Optimization / James Bergstra, Yoshua Bengio // J. Machine Learning Research. 2012. 13. P. 281–305.

А.А. ЛИТВИН¹, О.Г. ЖАРИКОВ², В.А. КОВАЛЕВ³

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

²Гомельская областная клиническая больница, Беларусь

³Объединенный институт проблем информатики

Национальной академии наук Беларуси, Минск

alitvin@kantiana.ru

СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ИНФИЦИРОВАННОГО ПАНКРЕОНЕКРОЗА НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Рассматриваются результаты разработки и изучения эффективности системы прогнозирования и диагностики инфицированного панкреонекроза, созданной на основе использования искусственных нейронных сетей. Созданная система поддержки принятия решений показала хорошие прогностические и диагностические характеристики. Применение разработанной системы в клинической практике позволило улучшить прогнозирование и диагностику тяжелого острого панкреатита, инфицированно-го панкреонекроза.

Ключевые слова: *система поддержки принятия решений, искусственные нейронные сети, медицина, тяжелый острый панкреатит, инфицированный панкреонекроз, прогнозирование, диагностика.*

Введение

В последние годы в медицине все большее внимание исследователей обращено на использование в сложных клинических случаях систем поддержки принятия решений (СППР) [1]. В неотложной панкреатологии

одной из самых важных задач является раннее прогнозирование и своевременная диагностика инфекционных осложнений тяжелого острого панкреатита (ТОП) [2, 3].

В последние годы наряду с отчетливой тенденцией к увеличению числа пациентов с острым панкреатитом чаще отмечаются и инфекционные осложнения заболевания, встречающиеся в 12–30 % наблюдений панкреонекроза [3]. Раннее прогнозирование инфицированного панкреонекроза с последующей адекватной профилактикой может позволить снизить число гнойно-септических осложнений ТОП [3]. Крайне сложной является своевременная диагностика этапа перехода стерильного панкреонекроза в инфицированный некроз поджелудочной железы. Инфицированный панкреонекроз в настоящее время лечится хирургическим путем, запоздалая операция может привести к генерализации инфекции [4].

В связи с большой частотой инфекционных осложнений панкреонекроза и высоким в этом случае риском летального исхода актуальной является разработка и внедрение системы раннего прогнозирования и диагностики инфицированного панкреонекроза (ИПН).

Данная работа является развитием исследований [5–11].

Цель исследования

Разработать, внедрить и оценить эффективность клинического использования СПНР на основе искусственных нейронных сетей для раннего прогнозирования и диагностики инфекционных осложнений тяжелого острого панкреатита.

Материалы и методы исследования

Для разработки «Системы прогнозирования и диагностики инфицированного панкреонекроза» (СПИДИПН) с помощью пакета STATISTICA 6.0 (StatSoft, США) была создана электронная таблица, которая формировалась на основании проведения ретроспективного и проспективного анализа историй болезни больных с острым панкреатитом. В сформированных электронных таблицах содержались результаты обследования и лечения 789 больных с тяжелым острым панкреатитом. Электронные таблицы базы данных «ТОП» формировались путем внесения данных из анкет, заполняемых на каждого больного с тяжелым острым панкреатитом. В электронные таблицы вносили информацию по 85 показателям: данные паспортной части, данные лабораторных и инструментальных методов исследования, подробная характеристика интраоперационных находок и

объем выполненных операций, характер послеоперационного лечения, послеоперационные осложнения, результаты патологоанатомического исследования и др. До внесения данных была выполнена их гармонизация для точности последующей интерпретации и статистического анализа. Данные регистрировались соответственно дню поступления пациента для лечения, первым суткам пребывания в стационаре, 2–3-м, 4–7-м, 8–14-м, 15–30-м, 31–60-м суткам. При нахождении пациента в ОАРИТ проводился функциональный динамический мониторинг жизненно важных функций пациента с регистрацией в базе данных. В используемых электронных таблицах содержались данные, входящие в шкалу M-APACHE II, что позволяло также определять тяжесть состояния больных по этой шкале.

Для разработки «Системы прогнозирования и диагностики инфицированного панкреонекроза» использовался пакет программ для построения искусственных нейросетей «STATISTICA Neural Networks v1.0» (StatSoft, США). С использованием «генетического алгоритма» выявлялись наиболее информативные входные признаки. Выходным нейроном являлся группирующий признак, имеющий два значения – «есть инфицированный панкреонекроз», «нет инфицированного панкреонекроза». Далее генерировались и обучались ИН-сети, и выбиралась наилучшая из них по критерию точности распознавания. В качестве топологии ИНС использовался «многослойный персептрон», обучение сети осуществлялось методом обратного распространения ошибки (back propagation). Наилучшая сеть из всех полученных в процессе обучения сохранялась в виде файла с расширением .snn.

Разработанная «СПИДИПН» состоит из двух функциональных блоков: 1) прогнозирования; 2) диагностика инфицированного панкреонекроза. Для построения первого функционального блока СПИДИПН – «Системы прогнозирования инфицированного панкреонекроза» (СПИПН), предназначенного для прогнозирования инфицированного панкреонекроза в течение первых 24 часов с момента госпитализации пациента, использованы ретроспективные клинические, лабораторные и инструментальные данные 398 больных. Дизайн исследования: ретроспективное, одноцентровое. Исключены пациенты с фульминантным течением острого панкреатита, посттравматическим и послеоперационным панкреатитом, а также пациенты, у которых на момент поступления имелись явные признаки инфекционных осложнений панкреонекроза (гноетечение из раны, по дренажам) ($n = 96$ – больные, по поводу которых задача прогнозирования являлась неактуальной).

Выборка из 398 объектов разделена произвольным образом на две группы: объекты первой группы использовались для обучения СПИПН

(298 примеров); объекты второй группы использовались для тестирования обученной СПИПН (100 примеров). В целях определения валидности разработанной СПИПН произведен анализ исходов в экзаменационной выборке из 128 больных с ТОП.

Для создания второго функционального блока СПИДИПН – «Системы диагностики инфицированного панкреонекроза» (СДИПН) использовался аналогичный подход. Выборка из 398 больных разделена произвольным образом на две группы: объекты первой группы использовались для обучения СДИПН (298 примеров, 113 из них с ИПН в катамнезе); объекты второй группы использовались для тестирования обученной СДИПН (100 примеров, 38 из них с ИПН в катамнезе). При этом применены клинические, лабораторные, инструментальные данные 151 пациента с ИПН, полученные в день идентификации инфицирования (результаты диагностической пункционной биопсии и (или) хирургического лечения). В случаях отсутствия результатов обследования в течение суток до момента верификации ИПН, использовались клиничко-лабораторные данные, полученные в течение трех суток до выявления инфекционных осложнений панкреонекроза. Инфицированный панкреонекроз подтвержден результатами микроскопического и (или) микробиологического исследований пунктатов (аспирационного материала) ткани поджелудочной железы, парапанкреатической клетчатки, жидкостных скоплений, полученных под УЗ-контролем и (или) при «открытой» операции. Дизайн исследования: ретроспективное, одноцентровое. Исключены пациенты с наличием явных признаков инфицирования при госпитализации в стационар. В целях определения валидности разработанной СДИПН произведен анализ исходов в экзаменационной выборке из 128 больных с ТОП.

В анализ исходов в экзаменационной выборке из 128 больных с ТОП для определения валидности разработанной СПИДИПН включены пациенты, данные которых не использовались для обучения и тестирования СПИДИПН; критерии исключения аналогичные используемым на этапе обучения и тестирования – исключены пациенты с фульминантным течением, посттравматическим и послеоперационным панкреатитом, а также пациенты, у которых на момент поступления имелись явные признаки инфицированного панкреонекроза и (или) оперированные по поводу инфекционных осложнений тяжелого острого панкреатита ранее трех суток с момента госпитализации ($n = 97$).

Основные результаты исследования

Входные переменные введены в виде непрерывных (интервальных или относительных) числовых данных (возраст, пульс, систолическое артериальное давление, эритроциты, гемоглобин, гематокрит, ЛИИ и т.д., всего 10 признаков) и номинальных значений (пол – мужской и женский; наличие жидкостных скоплений или пальпируемого инфильтрата в брюшной полости – да или нет, всего 13 признаков). Выходная бинарная переменная – «инфицированный панкреонекроз» имеет два значения: да, нет.

Из 23 показателей, отобранных методом экспертных оценок для построения системы прогноза, с помощью генетического алгоритма выделено 12 наиболее значимых.

Для выбора архитектуры сети нами использован автоматический конструктор сети – «мастер решений» пакета «STATISTICA Neural Networks v1.0» (StatSoft, США). Данный «мастер решений» позволяет по сравнению с другим вариантом выбора архитектуры сети – методом проб и ошибок – автоматизировать процесс поиска оптимальной сети, с помощью весьма сложных алгоритмов выделять наиболее перспективные варианты, предлагать исследователю наилучшую из апробированных сетей. Тип используемой сети – «многослойный перцептрон» (Multilayer Perceptron) – выбран ввиду его относительной простоты, небольших размеров, относительно быстрой работы. В итоге нами выбрана сеть типа «Многослойный перцептрон» с тремя слоями нейронов: 12 нейронов в первом (входном) слое, 11 – во втором, и 1 – в третьем (выходном) слое (рис. 1).

Обучение сети выполнено методом обратного распространения ошибки по материалам основной группы больных ($n = 298$). Суть метода заключалась в последовательном обучении сети на данных из обучающего множества. На каждой итерации (эпохе) все наблюдения из обучающего множества по очереди подавались на вход сети. Сеть обрабатывает их и выдает выходные значения, которые сравниваются с целевыми выходными значениями, и ошибка, т.е. разность между желаемым и реальным выходом, используется для корректировки весов сети так, чтобы уменьшить эту ошибку. В результате обучения СПИПН получены следующие результаты: суммарная ошибка разработанной сети невысока – 0,15 %, уровень точной классификации случаев – 98 %, площадь под ROC-кривой – 0,974.

Тестирование обученной сети выполнено на основании данных второй группы больных ($n = 100$), которые не использовались для обучения. В результате тестирования СПИПН получены следующие результаты: суммарная ошибка разработанной сети невысока – 0,18 %, уровень точной классификации случаев – 96 %, площадь под ROC-кривой – 0,954.

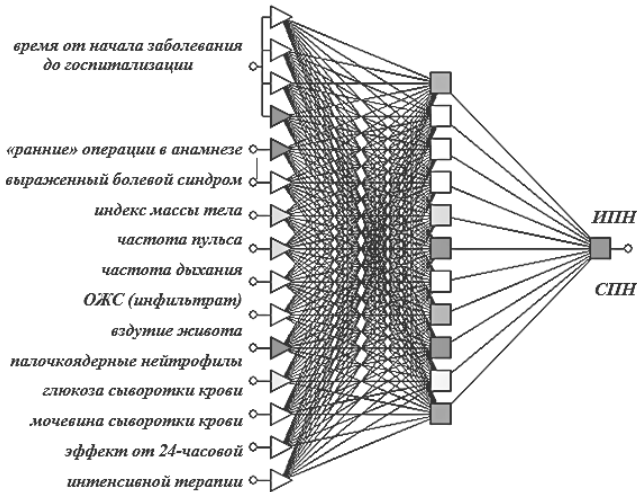


Рис. 1. Конфигурация ИНС по прогнозированию ИПН

Разработанная нами программа показала достаточно высокую дискриминационную способность в прогнозировании инфицированного панкреонекроза среди больных с тяжелым острым панкреатитом: чувствительность составила 86,7 % (81,2–92,2), специфичность – 94,0 % (90,1–97,9), ППЦ – 88,6 % (83,4–93,8), ОПЦ – 92,9 % (88,5–97,3), общая точность – 91,4 % (86,6–96,2). Различия между площадями под ROC-кривыми информативности СПИПН и многопараметрических систем в определении вероятности развития инфицированного панкреонекроза оказались статистически значимыми: $P = 0,003$ (СПИПН – M-APACHE II и СПИПН – шкала Д.А. Тагановича; Z-критерий, J. Hanley); $P = 0,005$ (СПИПН – шкала С.И. Третьяка с соавт.; Z-критерий, J. Hanley).

Второй функциональный блок СПИДИПН «Система диагностики ИПН» (СДИПН) обучен на основании результатов обследования 298 больных (113 из них с ИПН в анамнезе). После обучения и верификации нейросети изменились чувствительность входных параметров и степень их влияния на прогнозируемый результат.

Оптимальной конфигурацией нейронной сети был многослойный перцептрон с четырьмя слоями нейронов: 14 нейронов в первом (входном) слое, 13 – во втором, 13 – в третьем и 1 в четвертом (выходном) слое (рис. 2).

Обучение сети выполнено методом обратного распространения ошибки по материалам основной группы больных ($n = 298$) аналогично обучению СПИПН. Суть метода заключалась в последовательном обучении сети на данных из обучающего множества. На каждой итерации (эпохе) все наблюдения из обучающего множества по очереди подавались на вход сети. Сеть обрабатывает их и выдает выходные значения, которые сравниваются с целевыми выходными значениями, и ошибка, т.е. разность между желаемым и реальным выходом, используется для корректировки весов сети так, чтобы уменьшить эту ошибку. В результате обучения СПИПН получены следующие результаты: суммарная ошибка разработанной сети невысока – 0,16 %, уровень точной классификации случаев – 98 %, площадь под ROC-кривой – 0,987.

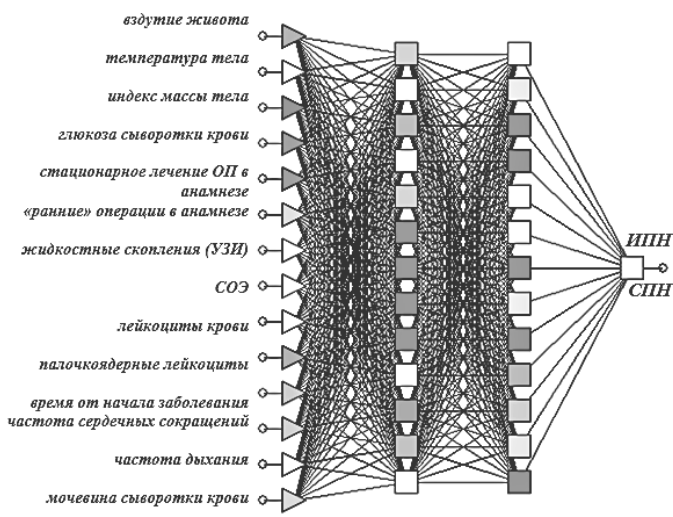


Рис. 2. Конфигурация ИНС по диагностике ИПН

Тестирование обученной сети выполнено на основании данных второй группы больных ($n = 100$), которые не использовались для обучения. В результате тестирования СДИПН получены следующие результаты: суммарная ошибка разработанной сети невысока – 0,18 %, уровень точной классификации случаев – 96 %, площадь под ROC-кривой – 0,964.

С целью определения диагностической эффективности «Системы диагностики ИПН» проведено изучение ее диагностических возможностей в

сравнении со шкалой M-APACHE II, тремя-четырьмя критериями синдрома системной воспалительной реакции (ССВР 3-4) и Infection Probability Score (IPS). Проверка валидности системы диагностики ИПН проводилась на «экзаменационной» группе больных, не вошедшей в обучающую выборку и группу тестирования.

«Очень хорошее» качество диагностической модели в распознавании инфицированного панкреонекроза продемонстрировала «система диагностики ИПН» (площадь под ROC-кривой 0,854 (95 % ДИ 0,791-0,917); $P < 0,001$ по сравнению с кривой абсолютной прогностической индифферентности). СДИПН в исследуемой выборке больных продемонстрировала чувствительность 82,2 % (75,7–88,7), специфичность – 88,0 % (82,5–93,5), ППЦ – 78,7 % (71,7–85,7), ОПЦ – 90,1 % (84,9–95,3), общая точность – 85,9 % (80,0–91,8). Выявлены статистически значимые различия в диагностических возможностях (AUC) сравниваемых шкал: СДИПН – IPS, $P = 0,03$; СДИПН – ССВР 3-4, $P = 0,005$; СДИПН – M-APACHE II, $P = 0,001$ (индекс Z, J. Hanley).

Выводы

Разработанная СППР прогнозирования инфицированного панкреонекроза на основе интеллектуального анализа общедоступных клинико-лабораторных и инструментальных методов исследования позволяет выделить группу больных с повышенным (> 5 %) риском развития инфекционных осложнений тяжелого острого панкреатита. Созданная система продемонстрировала следующие прогностические показатели: чувствительность – 86,7 % (95 % ДИ 81,2–92,2), специфичность – 94,0 % (90,1–97,9), ППЦ – 88,6 % (83,4–93,8), ОПЦ – 92,9 % (88,5–97,3), общую точность – 91,4 % (86,6–96,2). Данная система явилась наиболее точной среди сравниваемых шкал (различия с M-APACHE II, $P = 0,005$; шкала С.И. Третьяка с соавт., $P = 0,003$; шкала Д.А. Тагановича, $P = 0,005$) для определения риска инфекционных осложнений тяжелого острого панкреатита. Разработанная нами СППР для раннего прогнозирования инфекционных осложнений ТОП позволила выделить группу пациентов, угрожаемых по развитию инфицированного панкреонекроза.

Разработанная СППР при диагностике инфицированного панкреонекроза продемонстрировала хорошие диагностические характеристики: чувствительность – 82,2 % (75,7–88,7), специфичность – 88,0 % (82,5–93,5), ППЦ – 78,7 % (71,7–85,7), ОПЦ – 90,1 % (84,9–95,3), общую точность – 85,9 % (80,0–91,8). Данная система обладает наиболее высокой среди

сравниваемых шкал (M-APACHE II, $P = 0,001$; ССВР 3-4, $P = 0,005$; Infection Probability Score, $P = 0,03$) диагностической точностью.

Список литературы

1. Greenes R.A. Clinical decision support: the road ahead. Amsterdam; Boston: Elsevier, 2007. 581 p.
2. Савельев В.С., Филимонов М.И., Бурневич С.З. Панкреонекрозы. М: ООО «Медицинское информационное агентство», 2008. 264 с.
3. Bradley E.L.^{3rd}, Dexter N.D. Management of severe acute pancreatitis: a surgical odyssey // Ann. Surg. 2010. V. 251, N. 1. P. 6-17.
4. Forsmark C.E. Pancreatitis and its complications. New Jersey: Humana Press Inc., 2005. 349 p.
5. Mofidi R., Duff M.D., Madhavan K.K. Identification of severe acute pancreatitis using an artificial neural network // Surgery. 2007. V. 141. P. 59–66.
6. Keogan M.T., Lo J.Y., Freed K.S. Outcome analysis of patients with acute pancreatitis by using an artificial neural network // Acad. Radiol. 2002. V. 9. P. 410–419.
7. Halonen K.I., Leppaniemi A.K., Lundin J.E. Predicting fatal outcome in the early phase of severe acute pancreatitis by using novel prognostic models // Pancreatology. 2003. V. 3. P. 309–315.
8. Литвин А.А., Жариков О.Г., Ковалев В.А. Система поддержки принятия решений в прогнозировании и диагностике инфицированного панкреонекроза // Врач и информационные технологии. 2012. № 2. С. 54–63.
9. Hong W.D., Chen X.R., Jin S.Q., Huang Q.K., Zhu Q.H., Pan J.Y. Use of an artificial neural network to predict persistent organ failure in patients with acute pancreatitis // Clinics (Sao Paulo). 2013. V. 68, N. 1. P. 27–31.
10. Литвин А.А., Литвин В.А. Системы поддержки принятия решений в хирургии // Новости хирургии. 2014. Т. 22, № 1. С. 94–98.
11. van den Heever M., Mittal A., Haydock M., Windsor J. The use of intelligent database systems in acute pancreatitis – a systematic review // Pancreatology. 2014. V. 14. N.1. P. 9–16.

Секция 6

Нейробиология

**А.И. САМАРИН, Л.Н. ПОДЛАДЧИКОВА,
М.В. ПЕТРУШАН, Д.Г. ШАПОШНИКОВ**

Научно-исследовательский технологический центр нейротехнологий
Южного федерального университета, Ростов-на-Дону
lnpodladchikova@sfnedu.ru

ВОЗМОЖНЫЕ СТРАТЕГИИ ВЫБОРА ОБЛАСТЕЙ НА ПЕРИФЕРИИ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ ДЛЯ ФИКСАЦИИ ВЗГЛЯДА*

Рассматриваются результаты психофизических тестов при осмотре 2D изображений и навигации в виртуальной 3D среде. Показано, что в первом случае уменьшаются вероятность саккад большой амплитуды (более 3°) и длительность фиксаций (при саккадах более 8°). Обнаружено полимодальное распределение амплитуд саккад при навигации в 3D среде. Выявлены различия в траектории осмотра в условиях активной и пассивной навигации. Обсуждаются стратегии выбора областей для фиксации взгляда на периферии поля зрения.

Ключевые слова: *длительность фиксаций, амплитуда саккад, траектория осмотра.*

Введение

Имитация механизмов биологического зрения рассматривается как один из перспективных путей к созданию моделей и эффективных искусственных систем обработки зрительной информации [1–9]. Доминирующий подход в этом направлении состоит в имитации двух взаимосвязанных свойств биологического зрения, а именно, пространственно неоднородного представления зрительной информации от фовеа к ретинальной периферии и выбора областей интереса для фовеации и последующей обработки на высоком уровне разрешения [10, 11]. Системы этого типа рас-

* Работа выполнена при поддержке проектов Министерства образования и науки РФ №№ 2.955.2017/ПЧ и 6.5961.2017/БЧ.

сматриваются как фовеальная альтернатива [2, 3] стандартным искусственным зрительным системам с пространственно однородным разрешением и пирамидальным представлением входной информации. Преимущество фовеальной организации с вычислительной точки зрения состоит в резком уменьшении объема информации, которая должна быть обработана на высоком уровне разрешения [12].

В течение многих лет зрительные экспериментальные и модельные исследования сконцентрированы, в основном, на высокой остроте центрального зрения, в то время как роль периферического зрения до настоящего времени практически не изучена [13]. Имеются многочисленные сведения [10, 11, 14], в большей или меньшей мере обоснованные экспериментальными данными, в частности, о больших размерах рецептивных полей, о большей чувствительности к движению и эмоционально значимым и крупным объектам, преобладании нейронов Y-типа на периферии поля зрения. Предполагается, что периферия поля зрения может принимать участие в реализации функций, типичных для центрального зрения [13]. Не изученность механизмов выбора областей интереса на периферии поля зрения в реальной зрительной системе определяет то, что в модельных исследованиях эта проблема решается на основе эвристических алгоритмов, построении карт выделенности (saliency maps) с учетом результатов психофизических тестов о распределении точек фиксации взгляда при осмотре конкретных изображений [15, 16].

В данной работе представлен анализ результатов психофизических тестов, на основе которого рассматриваются возможные стратегии выбора областей для фиксации взгляда на периферии поля зрения.

Результаты и обсуждение

Функциональная роль микродвижений во время фиксации взгляда

Во время фиксации взгляда происходят несколько видов движений глаз, различающихся по амплитуде, частоте и скорости, в частности – дрейф, тремор и микросаккады [17]. На основе малых размеров рецептивных полей нейронов в области представительства фовеальной части поля зрения, сопоставимых с амплитудой тремора, предполагается, что тремор способствует торможению процессов адаптации к стимулу именно в этой области. Возможно, что тремор выполняет также другую функциональную роль, а именно, – участвует в детектировании первичных признаков, в частности, в определении перепадов яркости [18] и ориентации сверхпороговых локальных контрастных элементов изображения [1, 7]. Рассмотр-

рим алгоритм, реализованный в визуальном сенсоре фовеального типа (рис. 1, 1).

При эксцентриситете оптической оси объектива относительно оси его вращения все точки проецируемого изображения совершают циркулярные микросмещения на воспринимающей матрице с амплитудой смещения ε (уравнение (1)) аналогично тремору глаза.

$$x = x_0 + \varepsilon \cos \omega t; \quad y = y_0 + \sin \omega t. \quad (1)$$

Если на воспринимающие фоторецепторы попадают перепады яркости $\nabla E_c(i, j)$, то их выходные сигналы $U_c(i, j, t)$ будут носить периодический характер с амплитудой пропорциональной модулю градиента перепада яркости и фазовым сдвигом α (уравнение (2)), отображающим направление перепада яркости фрагмента изображения на данном фоторецепторе:

$$U_c(i, j, t) = K \cdot \text{mod}(\nabla E_c(i, j)) \cdot \cos(\omega t + \alpha). \quad (2)$$

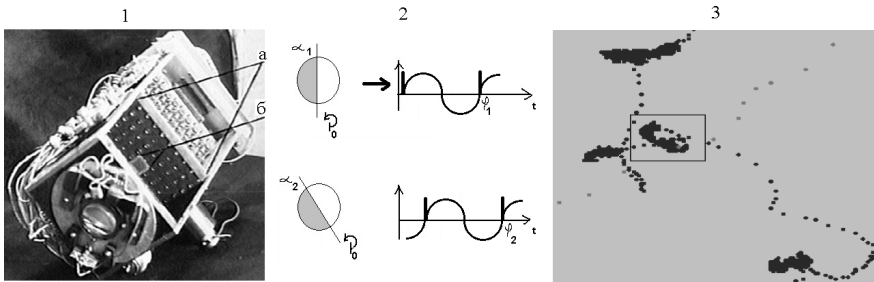


Рис. 1. 1 – модель визуального сенсора с периферической (а) и центральной (б) матрицей светочувствительных элементов и устройством, обеспечивающим микросмещение изображения; 2 – динамика выходных сигналов фоторецепторов фовеального сенсора и формирование единичных импульсных выходных сигналов сенсора; 3 – примеры фиксационных пятен при просмотре двумерных изображений

При нарастающем выходном периодическом сигнале U и достижении им нулевого значения формируется единичный импульсный выходной сигнал (рис. 1, 2). Аппаратно реализованная модель фовеального сенсора наглядно демонстрирует, что наличие периодических микросмещений изображения на сетчатке в виде тремора позволяет не только выделить перепады яркости [18], но и определить ориентации этих перепадов, попадающих на одиночные фоторецепторы. Можно предположить, что, как и в модели, на выходе сетчатки с периодичностью тремора формируются пространственно-временные паттерны импульсов ганглиозных клеток

фовеальной области сетчатки; наличие импульсов свидетельствует о наличии сверхпороговых перепадов яркости, а их фазовые сдвиги отражают различия в ориентации этих перепадов.

Другой вид движений глаз во время фиксаций взгляда – микросаккады, которые имеют амплитуду менее 1° [17, 19]. Показано, что эти движения в большей мере влияют на процессы, реализуемые в области поля зрения с эксцентриситетом около 9° от центра фиксации, и влияют на частоту импульсации нейронов на всех уровнях зрительных путей [17]. В известных работах, в основном, анализировалось количество, частота и амплитуда микросаккад, в то время как связь их направления с пространственными координатами последующих макросаккад и фиксации взгляда не рассматривалась. Изучение этих вопросов в перспективе представляет интерес в свете выбора областей на периферии поля зрения для фиксации взгляда. Один из путей решения этой задачи состоит в анализе пространственно-временной структуры фиксационных пятен (рис. 1, 3), по аналогии с тем, как это реализуется в случае анализа траекторий макросаккад [4, 5, 8].

Важным аспектом процессов обработки зрительной информации, как в текущей, так и в последующих точках фиксации, является их преднастройка в соответствии с мотивацией и результатами предыдущего этапа обработки. По-видимому, участие структур зрительной и окулomotorной систем различных уровней реализуется за счет прямых центрифугальных влияний, которые имеют ретинотопическую организацию и могут сказываться, в том числе и на функционировании элементов сетчатки [20]. Таким образом, создаются условия для формирования локального замкнутого контура управления процессами анализа зрительной информации и регуляции глазных движений.

Динамика амплитуды саккад и длительности фиксаций взгляда от центра к периферии при осмотре двумерных изображений

Для представленных в этом разделе результатов использованы данные проведенных нами ранее [8] психофизических тестов со свободным осмотром и поиском измененных фрагментов различных двумерных изображений. Во всех тестах распределение анализируемых параметров движений глаз было сходным. На рис. 2 видно, что вероятность саккад с амплитудой более 3° при осмотре двумерных изображений уменьшается по правилу, близкому к экспоненциальному, а длительность фиксаций уменьшается в виде ступенчатой функции при амплитуде саккад более 8° .

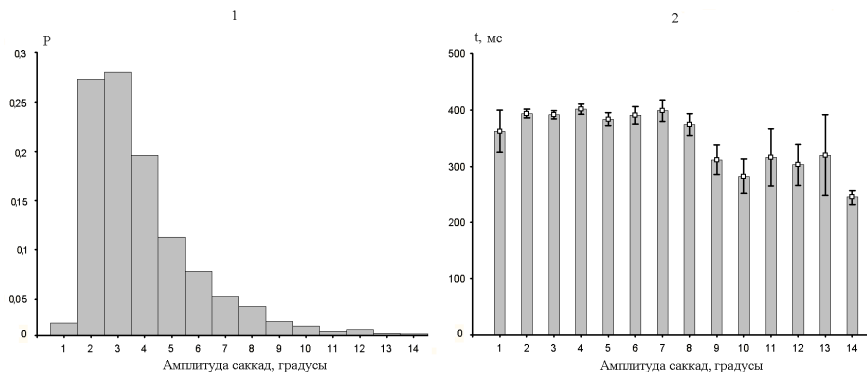


Рис. 2. Сводное распределение вероятности саккад ($n = 2696$) различной амплитуды (1); зависимость длительности фиксаций от амплитуды предшествующей саккады при просмотре двумерных изображений (2)

Динамика параметров движений глаз в условиях активной и пассивной навигации в трехмерной виртуальной среде

В качестве экспериментальной платформы использовалась система видеорегистрации движений глаз SMI iViewX Hi-Speed 1250. Для синтеза и предъявления зрительных стимулов был разработан программный модуль, совместимый с комплексом iVewX, который позволяет создавать текстурированные трехмерные объекты сложной формы в виртуальной среде (рис. 3, 1).

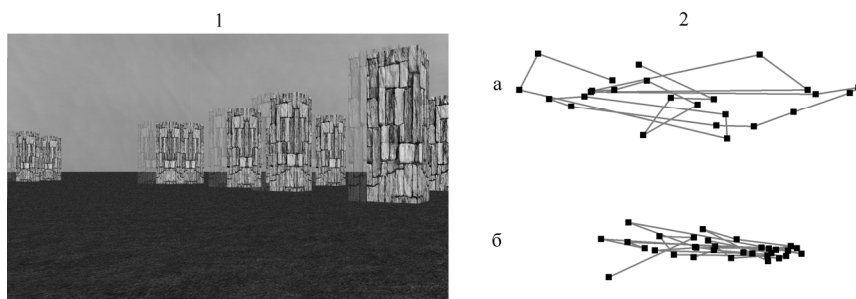


Рис. 3. Фрагмент виртуальной 3D среды (1) и траектории осмотра при активной (2, а) и пассивной (2, б) навигации; малые черные квадраты – точки фиксации взгляда; соединяющие их линии – саккады

С помощью этого же программного модуля испытуемый клавишами управления курсором может задавать тот или иной тип движения виртуальной камеры в среде. Виртуальная среда представляет собой совокупность поверхностей, моделирующих реальные объекты. Элементы среды представлены набором текстурированных объектов. В качестве элемента текстуры опорной поверхности выбрано изображение травянистого покрова, препятствия имеют каменистую текстуру. На опорной горизонтальной поверхности расположена область препятствий, состоящая из 21 вертикально ориентированного объекта. В тестах навигации в 3D виртуальной среде участвовали пять испытуемых с нормальным зрением в возрасте от 20 до 28 лет. Протокол эксперимента утвержден комиссией по биоэтике ЮФУ. Во всех тестах расстояние между стимуляционным монитором и испытуемым было 80 см.

Активный навигационный эксперимент. Испытуемый с помощью клавиш управления курсором перемещался в трехмерной среде, обходя препятствия. При этом испытуемому давалась инструкция: как можно быстрее пройти область препятствий, не столкнувшись с колоннами. При активной навигации испытуемый имел возможность с помощью клавиш управления курсором выполнять два вида движений: поступательное перемещение вперед с постоянной скоростью путем нажатия и удержания соответствующей клавиши; повороты направо или налево с постоянной угловой скоростью путем нажатия и удержания соответствующих клавиш поворота.

Пассивный навигационный эксперимент. При пассивной навигации алгоритм перемещений создавался автоматически и задача испытуемого состояла только в просмотре динамических сцен. Испытуемому для осмотра предъявлялась та же среда, но движения камеры определялись не данным испытуемым, а траекторией ее смещений в активном навигационном эксперименте другого испытуемого.

Амплитуда саккад ($4,7 \pm 0,3^\circ$ и $4,8 \pm 0,3^\circ$) и длительность фиксаций (276 ± 13 и 280 ± 13 мс) были сопоставимы в тестах активной и пассивной навигации. Вместе с тем, траектории движений глаз были существенно различны (рис. 3, 2, а, б). Видно, что в случае активной навигации фиксации взгляда более широко распределены как в горизонтальном, так и вертикальном направлении виртуальной среды по сравнению с пассивной навигацией. В соответствии с классификацией траекторий осмотра [4], при активной навигации траектория может быть отнесена к сканирующему типу, в то время как в случае пассивной навигации – к фокальному.

Проведен также анализ распределения амплитуд саккад при навигации в виртуальной 3D среде (рис. 4, а). Видно, что распределение амплитуд саккад в этом случае, в отличие от мономодального при просмотре двумер-

ных изображений, близко к полимодальному. Различия между этими распределениями достоверны ($p = 0,05$, t-test). Вид распределения амплитуд саккад указывает на участие процессов различной природы [21] в реализации зрительных функций при навигации в виртуальной 3D среде.

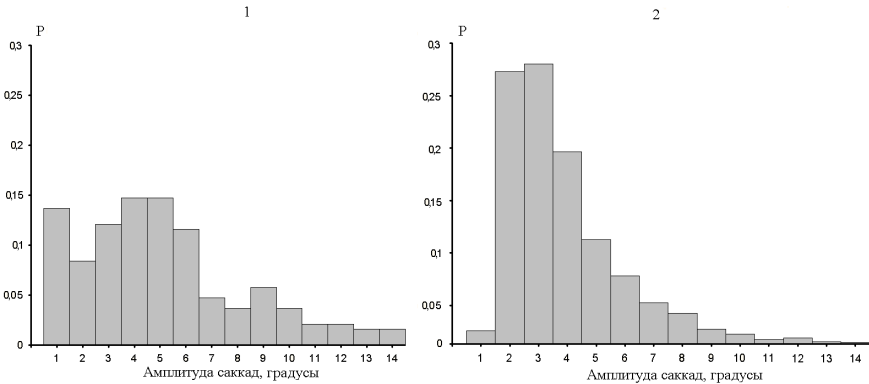


Рис. 4. Распределение вероятности саккад различной амплитуды ($n = 193$) при навигации в виртуальной 3D среде (1) и просмотре двумерных изображений (2)

Заключение

Представленные результаты анализа данных, полученных в психофизических тестах, в сочетании со сведениями литературы позволяют рассмотреть возможные стратегии выбора областей для фиксации взгляда на периферии поля зрения.

Одна из них может состоять в пошаговом смещении взгляда к периферии поля зрения за счет саккад малой и средней амплитуды (от 2° до 5°). Такие смещения сопровождаются фиксациями короткой длительности, в течение которых детектируются первичные признаки изображений за счет тремора и микросаккад. Для другой стратегии, в том случае, если на периферии имеются объекты со свойствами, привлекающими зрительное внимание и определяемыми мотивацией и преднастройкой, могут быть характерны саккады и длительности фиксации больших величин. И, наконец, возможна также стратегия, основанная на представлении фовеальной информации в контексте с периферической. При этом выбор области на периферии поля зрения может определяться как первичными признаками, так и когнитивными механизмами. Один из вариантов контекстной стратегии, основанный на первичных признаках, был реализован в модели [6].

Детальные свойства этих стратегий и их вклад на различных этапах решения зрительных задач еще предстоит выяснить в психофизических тестах и с помощью моделирования.

Список литературы

1. Самарин А.И. Нейросетевые модели в задачах управления поведением робота // Нейроинформатика-2001. III Всероссийская научно-техническая конференция. Лекции по нейроинформатике. М.: МИФИ, 2001. С. 1001–1022.
2. Bajcsy R. Active perception // Proc. of the IEEE. 1988. V. 76. P. 996–1005.
3. Bandera C., Scott P., Machine vision for active pursuit. The foveal alternative // J. Electronic Defense. 1991. P. 58–66.
4. Podladchikova L.N., Shaposhnikov D.G., Tikidgji-Hamburyan A.V., Koltunova T.I., Tikidgji-Hamburyan R.A., Gusakova V.I., Golovan A.V. Model-based approach to study the mechanisms of complex image viewing // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2009. V. 18. N 2. P. 114–121.
5. Privitera C.M., Stark L. Scanpath theory, attention and image processing algorithms for prediction of human eye fixations. L. Itti, G. Rees, J.K. Tsotsos (Eds) // Neurobiology of Attention, Elsevier, Academic. 2005. P. 296–299.
6. Rybak I., Gusakova V., Golovan A., Podladchikova L., Shevtsova N. Attention-guided recognition based on «What»; and «Where» representations: a behavioral model. L. Itti, G. Rees, J.K. Tsotsos (Eds) // Neurobiology of Attention, Elsevier, Academic. 2005. P. 663–670.
7. Samarин А.И. Formation of environment description by a robot on the basis of sensorimotor relationship. An experimental study // Proc. of the 39 IWK, Technical University of Ilmenau. 1994. V. 2. P. 61–66.
8. Samarин А., Koltunova Т., Osinov V., Shaposhnikov D., Podladchikova L. Scanpaths of complex image viewing: insights from experimental and modeling studies // Perception (Yarbus Special Issue). 2015. V. 44. N 8–9. P. 1064–1076.
9. Walther D.B., Koch C. Attention in hierarchical models of object recognition // Progress in Brain Research. 2007. V. 165. P. 57–78.
10. Ярбус А.Л. Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965. 173 с.
11. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 239 с.
12. Schwartz E.L., Greve D.N., Bonmassar G. Space-variant active vision: definition, overview and examples // Neural Networks. 1995. V. 8. N 7/8. P. 1297–1308.
13. Burnat K. Are visual peripheries forever young? // Hindawi Publishing Corporation Neural Plasticity. 2015. V. 2015. Article ID 307929. 13 p.
14. Clyde W. Oyster; Horace B. Barlow. Direction-selective units in rabbit retina: distribution of preferred directions // Science. 1967. V. 155. N 3764. P. 841–842.
15. Koch C., Ullman S. Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry // Hum. Neurobiol. 1985. V. 4. P. 219–227.
16. Nuthmann A., Smith T.J., Engbert R., Henderson J.M.: CRISP: a computational model of fixation durations in scene viewing // Psychol. Rev. 2010. V. 117. N 2. P. 382–405.
17. Martinez-Conde S., Stephen L. Macknik S., Troncoso X., Dyar T. Microsaccades counteract visual fading during fixation // Neuron. 2006. V. 49. P. 297–305.

18. Лебедев Д.Г., Ловецкий А.К. Модель нейронной сети, использующей микросмещения глаз, для выделения контрастов на изображении // Биофизика. 2004. Т. 49. N 4. С. 760–765.

19. Laubrock J., Kliegl R., Rolf s M., Engbert R. When do microsaccades follow spatial attention? // Attention, Perception, & Psychophysics. 2010. V. 72. N 3. P. 683–694.

20. Marchiafava P. Centrifugal actions on amacrine and ganglion cells in the retina of the turtle // J. Physiol. 1976. V. 255. P. 137–155.

21. Koltunova T.I., Podladchikova L.N., Shaposhnikov D.G., Vladimirkii B.M., Syrkin L.D., Kryuchkov B.I., Usov V.M. Dynamics of the duration of gaze fixation and event-related potentials on presentation of fading-in images and distractors // Neuroscience and Behavioral Physiology. 2017. V. 47. N 3. P. 321–327.

И.А. СМІРНІТСКАЯ

Научно-исследовательский институт системных исследований
Российской академии наук, Москва
i.a.i.a@mail.ru

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ УРОВНИ УПРАВЛЕНИЯ ЛОКОМОЦИЯМИ, ОТ СПИНАЛЬНОГО ДО ДИЭНЦЕФАЛИЧЕСКОГО

Описываются уровни управления движениями, имеющиеся в мозге позвоночных животных. Рассмотрены 5 нижних уровней: уровень центрального генератора паттернов спинного мозга, ретикулоспинальный уровень, мезенцефалический локомоторный уровень, диэнцефалический локомоторный уровень. Область латерального гипоталамуса, являющаяся источником орексинергических влияний и оказывающая общее возбуждающее действие, тоже рассматривается как один из уровней. Обсуждаются поведенческие задачи, которые обусловили появление такого рода схем управления движениями.

Ключевые слова: *локомоция, мезенцефалический локомоторный центр, диэнцефалический локомоторный центр, латеральный гипоталамус, уровни управления движениями.*

Введение

Классические объяснения устройства мозга человека рассматривают его как результат эволюции [1], при этом эволюция трактуется, как поочередное появление в мозге новых управляющих структур и увеличение их размеров. Материалом для таких обобщений служит эволюция позвоноч-

ных животных [1]. Доступные сегодня экспериментальные данные свидетельствуют о том, что общий план строения мозга, и наличие отдельных устройств, одинаковы у всех позвоночных [2]; различия носят преимущественно количественный характер. В то же время, генетические исследования обнаруживают сходство многих систем мозга позвоночных с аналогичными системами беспозвоночных животных [3]. Эти факты подталкивают к тому, чтобы рассматривать эволюцию мозга, как устройства управления движениями, отвечающего все более усложненной реакцией на сигналы окружающего мира, воспринимаемые вновь возникающими в организме сенсорными приемниками разных типов. Важно, что события, рассматриваемой в таком ключе эволюции, разыгрывались до появления позвоночных животных. Эти события привели к появлению структур – генетических предшественников разделов мозга, существующих у современных позвоночных. Очередность рассмотрения вновь возникающих устройств будем, следуя Бернштейну, вести «снизу вверх», – от спинного мозга, к продолговатому мозгу, среднему, и промежуточному. То есть, основываясь на допущении, что степень отдаленности структуры от «центра мозга» коррелирует со временем возникновения устройства. Приемлемость этого утверждения для каждого конкретного случая надо рассматривать отдельно.

Центральные генераторы паттерна

Древнейшим ритмическим движением является локомоция – перемещение тела в пространстве. У билатерально симметричных животных устройство, генерирующее команды запуска ритмического движения типа плавания, содержит две популяции нейронов поочередно тормозящих друг друга по принципу тяни-толкая (push-pool), при этом активная в данный момент популяция дает двигательную команду мышцам «своей» стороны тела. Управляющая система более сложного ползания или бега наземных животных содержит сопряженные каскады схем такого же типа push-pool: для флексоров и экстензоров каждого сустава, для обеспечения поочередности движений правых и левых конечностей, для обеспечения согласованности движений передних и задних конечностей [2]. Эти устройства, имеющиеся у всех позвоночных, называются центральными генераторами паттерна (central pattern generator, CPG). Они обеспечивают стереотипный рисунок движения и находятся в спинном мозге. Такое же, командующее шагами устройство, есть и у человека, оно находится в поясничном отделе спинного мозга.

Запуск центральных генераторов паттерна вышележащими структурами

У миноги командный уровень расположенный выше, чем CPG, находится в нескольких ядрах ретикулярной формации среднего мозга (рис. 1), в так называемых, ретикулоспинальных командных нейронах (RS). К ним приходит сенсорная информация от кожных рецепторов, реагирующих на прикосновение. болевое или тепловое воздействие, кроме того они получают команды от вышераположенных центров. RS нейроны отвечают за инициацию уплывания животного в ответ на прикосновение. Запуск локомоции происходит не только в ответ на сенсорную стимуляцию, но и обусловлен воздействием со стороны, запускающих движение нейронов, которые находятся в латеральном гипоталамусе. Среди них есть такие, которые инициируют движение при изменениях освещенности (их называют находящимися вне сетчатки фотосенсорными клетками) [4], есть чувствительные к химическому составу окружающей среды клетки. Орксинергические зоны гипоталамуса связаны с общей активацией и участвуют в исследовательском поведении, их стимуляция вызывает локомоцию. Кроме того, в гипоталамусе находятся дофаминергические нейроны, проектирующиеся в спинной мозг. Анатомически показано существование возбуждающих проекций от связанных с инициацией движения областей гипоталамуса в RS [5].

Мезэнцефалическая локомоторная область (mesencephalic locomotor region MLR), – следующий по старшинству уровень запуска локомоций (рис. 1). Он впервые был обнаружен у кошки [6], а впоследствии у всех позвоночных животных. Если движение, запускаемое активацией ретикулоспинальных нейронов (RS) стереотипно, то активируя MLR можно получить различные паттерны движений [7]. В работах [8,9] обнаружено, что запуск движения через MLR у миноги происходит в ответ на обонятельный сигнал. А далее, этот сигнал передается на RS, и вызывает движение. Удаление MLR делает невозможным запуск движения обонятельным стимулом. Связанные с инициацией движения области гипоталамуса дают проекции не только на RS, но и на MLR.

Важно разобраться в отличиях этого нового иерархического уровня управления движениями от предыдущего. Мезэнцефалическая локомоторная область включает педункулопонтинное ядро покрышки (pedunculopontine tegmental nucleus PPN) и клиновидное ядро (cuneiform nucleus, CN), причем у разных позвоночных движение может вызываться или с одной или с другой из этих областей [6]. Ранее было показано, что PPN и вокруг лежащие области входят в состав так называемой «ретику-

лярной активирующей системы». Активация этой системы приводит к пробуждению от сна, к повышенному уровню внимания. То есть две области: локомоторная и активирующая частично пересекаются. Таким образом, активация MLR вызывает два различных явления: запуск локомоции и усиление внимания к сенсорным стимулам [7].

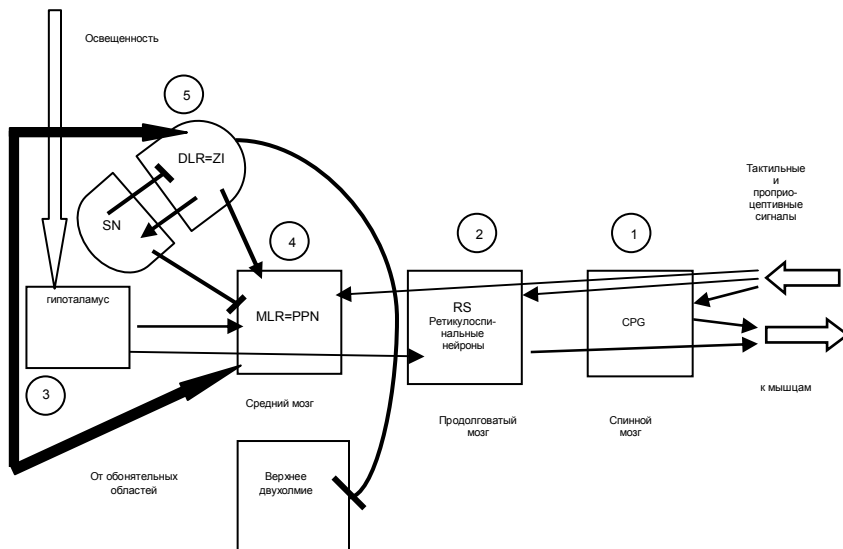


Рис. 1. Схема управляющих движениями иерархических уровней

Следующий уровень управления – диэнцефалическая локомоторная область (diencephalic locomotor region DLR). Эту область разные авторы называют по-разному: диэнцефалической локомоторной областью, субталамической локомоторной областью или латеральным гипоталамусом. В работе [10] разъясняется, что локомоторные области диэнцефалона, ошибочно относимые к субталамусу на самом деле входят в состав вентрального таламуса. Большая часть вентрального таламуса состоит из тормозных ГАМК-эргических нейронов, но именно данная область, называемая *zona incerta* (ZI), содержит и тормозные и возбуждающие нейроны. Активация возбуждающих, глутаматергических нейронов приводит к запуску локомоции. В [11] показано, что активация «субталамической локомоторной области» вызывает локомоцию исследовательского типа. Данному управленческому уровню приписывают участие в реакции пробуждения (arousal), в проявлении внимания к стимулу, в управлении висцеральными

функциями, в управлении поворотом головы и движениями глаз в ответ на появление неожиданного внешнего объекта.

Особенности данного уровня управления локомоциями разобраны в посвященной функциональной роли работе Митрофаниса [12]. Главные связи ZI – с выходным ядром базальных ганглиев – черной субстанцией, и педункулопонтинным ядром, то есть с нижележащей MLR. Входы в ZI от нижележащих областей частично пересекаются со входами в MLR. ZI получает входы: от зон спинного мозга передающих тактильную и проприоцептивную информацию, от ядра тройничного нерва, от красного ядра и мозжечка, от ядер шва, от педункулопонтинного ядра, от околводопроводного серого вещества. Важными являются связи с глубокими слоями верхнего двухолмия, управляющими поворотами головы и движениями глаз.

Входы на верхнее двухолмие упорядочены: латеральная область ZI проектируется в медиальную часть двухолмия, а медиальная часть ZI проектируется латеральную часть двухолмия. Каждая область, проектирующаяся на ZI, получает обратные входы. Вышележащие входы ZI включают входы от большинства корковых областей, причем наиболее значительны входы от моторных, соматосенсорных, парietальных областей и лимбических. Также ZI связана с интраламнарными ядрами таламуса, передающими информацию о прикосновениях, и с гипоталамусом. Митрофанис предполагает, что глобальная роль ZI заключается в том, что эта область получает внешнюю, соматосенсорную информацию, и внутреннюю, висцеральную, и отвечает изменением уровня arousal и привлечением внимания к изменившейся внешней афферентации, например, поворачивает голову и глаза в сторону прикоснувшегося предмета.

Общая схема уровней управления

Когда-то Николай Бернштейн выделил 5 уровней управления движениями: руброспинальный, таламо-паллидарный, пирамид-ностриальный, теменно-премоторный, высший кортикальный.

Первый, из его уровней составной, – красное ядро, расположенное рядом с педункулопонтинным ядром, то есть на уровне MLR, отвечает за управление позой, взаимодействие с мозжечком, не связано с локомоцией. Воздействие на спинальном уровне, то есть на уровне CPG, может вызывать локомоцию, например фиктивное плавание миноги [13]. На рис. 1 представлены все описанные выше управленческие структуры – центральный генератор паттерна, ретикулоспинальная область, гипоталамус, мезэнцефалическая локомоторная область, и диэнцефалическая. На рис. 2 эти уровни рассмотрены с точки зрения системы «сенсорный стимул-моторная реак-

ция». Двигаясь снизу вверх видно, что нового привносит каждая область в управление. Номер 1, центральный генератор паттерна – чисто исполнительская структура. Номер 2, ретикулоспинальная область, может передавать на СРГ внешние влияния, например, необходимые для поворота [14], но более важно то, что на этом уровне появляется воздействие гипоталамуса. Участие гипоталамуса в запуске локомоции (номер 3 на рис. 1) первоначально было, по-видимому, обусловлено необходимостью перемещения в освещенную область, но у современных позвоночных орексинергические области латерального гипоталамуса выполняющие роль инициации движения, кроме того являются регулятором сна и бодрствования, оказывают общее возбуждающее действие на большое число областей мозга. Номер 4, мезэнцефалическая локомоторная область, отличается тем, что помимо запуска локомоции, воздействие на эту область приводит и к усилению внимания к сенсорным стимулам, опосредованному выбросом ацетилхолина. Номер 5, диэнцефалическая локомоторная область. Удаление этой области приводит к временному прекращению произвольных движений, но через 12 дней происходит восстановление [15]. Главные игроки этого управленческого уровня – не только зона *incerta* вентрального таламуса, но и выходное ядро базальных ганглиев, – черная субстанция. Она состоит из тормозных нейронов и тормозит MLR.

Заключение

Возникновение каждого управляющего уровня решало определенную поведенческую задачу с помощью адекватного аппарата. Первый уровень стал возможен из-за появления устройства, воспринимающего опасные кожные воздействия; реакция этого уровня – оборонительная. Второй уровень ознаменован появлением влияний от управляющего центра – прообраза гипоталамуса, в котором появились светочувствительные клетки, так что освещенность смогла влиять на эндокринные функции и локомоцию. Запуск движения теперь стал возможен только при совпадении сигнала от гипоталамуса и кожного воздействия. Потом, когда появились глаза, функция светочувствительности перешла к сетчатке глаза и возник специальный путь, передающий сведения об освещенности специальному ядру гипоталамуса (супрахиазматическому), которое, с помощью специально сконструированной машины циркадных ритмов, стало воздействовать на область гипоталамуса, запускающую движения: на латеральный гипоталамус, от которого, через специальную орексинергическую систему этот сигнал поступает на все обслуживающие движение области мозга. Третий, мезэнцефалический, уровень возникает с появлением обонятельной

рецепции. На основе обонятельной рецепции возникнет потом система выбора двигательного отклика на внешние сигналы, а пока выбор прост: усиление влияния внешнего сигнала с помощью выброса ацетилхолина. Именно потому, что это влияние было таким неспецифическим, потом этот уровень был использован как источник общего возбуждения, arousal. Четвертый уровень, по-видимому, тоже появился в связи с обонянием, – потребовалось поворачивать, и тогда возник прообраз тектума, в котором, как известно, есть область, управляющая поворотами головы и глаз в направлении внешнего сигнала, и появилась зона incerta, через воздействие на тектум управляющая этими поворотами. Современная ZI управляет поворотами в направлении соматосенсорной стимуляции, а не обонятельной, но задача поворота возникла сначала, как поворот на внешнюю цель, топографически точные отображения внешнего мира в таких областях, как соматосенсорная или зрительная появились позже.

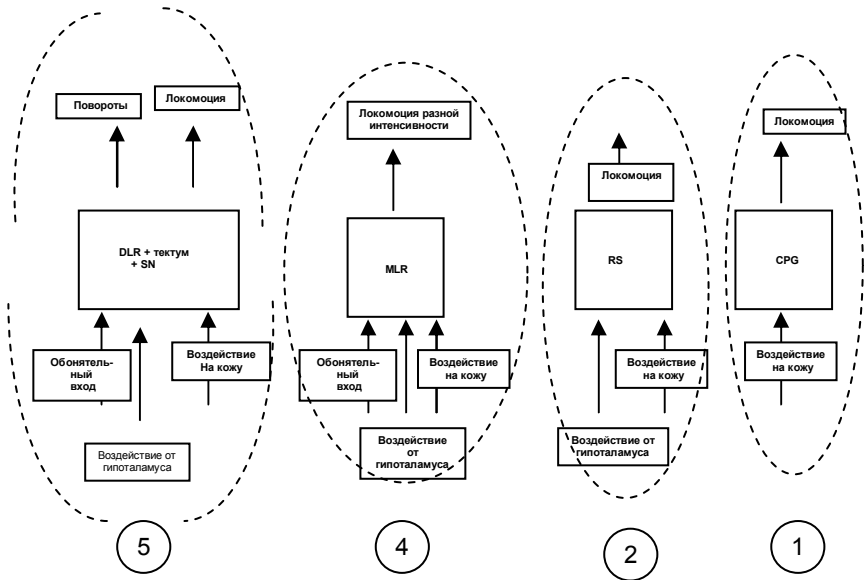


Рис. 2. Уровни управления движениями с точки зрения сенсорный вход – моторный выход. Как меняются входы, каким разным выходам это соответствует

Когда появились новые уровни, надстроившиеся над описанными здесь управляющими уровнями, возникли новые сложные обмены сигнала

лами между уровнями, то есть между такими разделами как кора, стриатум, рассмотренные здесь нижние отделы мозга. Здесь они не показаны.

Описанные здесь уровни управления примерно совпадают по диапазону с двумя низшими уровнями Бернштейна. Три высших уровня Бернштейна относятся к управляющей системе кора-базальные ганглии, мы их не рассматривали. Современный уровень знаний о структуре нервной системы привел к тому, что низших уровней оказалось не 2, а 5. Анатомия и физиология нервной системы уже достаточно подробно описывают строение и функции различных структур мозга, поэтому другие уровни вряд ли появятся, но в настоящее время мы очень приблизительно представляем себе, как именно устроено управление каждого уровня, как они взаимодействуют между собой, можем только предполагать, какова тактовая раскладка сигналов, которыми обмениваются эти управляющие структуры.

Список литературы

1. Бернштейн Н. А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М., 1966.
2. Grillner S, Wallén P, Saitoh K, Kozlov A, Robertson B. Neural bases of goal-directed locomotion in vertebrates—An overview. *Brain Res Rev.* 2008 Jan; 57(1):2–12.
3. Tessmar-Raible K, Raible F, Christodoulou F, Guy K, Rembold M, Hausen H, Arendt D. Conserved sensory neurosecretory cell types in annelid and fish forebrain: insights into hypothalamus evolution. *Cell.* 2007 Jun 29;129(7):1389–400.
4. Horstick E.J., Bayleyen Y., Sinclair J.L., Burgess H.A. Search strategy is regulated by somatostatin signaling and deep brain photoreceptors in zebrafish. *BMC Biol.* 2017 Jan 26;15(1):4.
5. Jordan L.M., Slavinska U. Chapter 17 – The Brain and Spinal Cord Networks Controlling Locomotion. In *Neural Networks in Brain Function. CNS Disorders and Therapeutics* 2014. P. 215–233.
6. Shik M.L., Severin F.V., Orlovskii G.N. [Control of walking and running by means of electric stimulation of the midbrain]. *Biofizika.* 1966. 11. 659–666.
7. Dubuc R., Brocard F., Antri M., Fénelon K., Gariépy J.F., Smetana R., Ménard A., Le Ray D., Viana Di Prisco G., Pearlstein E., Sirota M.G., Derjean D., St-Pierre M., Zielinski B., Auclair F., Veilleux D. Initiation of locomotion in lampreys *Brain Res Rev.* 2008 Jan;57(1):172–82.
8. Derjean D., Moussaddy A., Atallah E., St-Pierre M., Auclair F., Chang S., Ren X., Zielinski B., Dubuc R. A Novel Neural Substrate for the Transformation of Olfactory Inputs into Motor Output *PLoS Biol.* 2010 Dec 21;8(12):e1000567.
9. Daghfous G., Green W.W., Alford S.T., Zielinski B.S., Dubuc R. Sensory Activation of Command Cells for Locomotion and Modulatory Mechanisms: Lessons from Lampreys. *Front Neural Circuits.* 2016 Mar 22;10:18.

10. Ménard A., Grillner S. J Diencephalic locomotor region in the lamprey afferents and efferent control. *Neurophysiol.* 2008 Sep;100(3):1343–53.

11. Mori S., Sakamoto T., Ohta Y., Takakusaki K., Matsuyama K. Site-specific postural and locomotor changes evoked in awake, freely moving intact cats by stimulating the brainstem. *Brain Research*, 505 (1989) 66–74.

12. Mitrofanis J Some certainty for the «zone of uncertainty»? Exploring the function of the zona incerta. *Neuroscience.* 2005;130(1):1–15.

13. Wallén P., Williams T.L. Fictive locomotion in the lamprey spinal cord in vitro compared with swimming in the intact and spinal animal. *J Physiol.* 1984 Feb;347:225–39.

14. Kozlov A.K., Kardamakis A.A., Hellgren Kotaleski J., Grillner S. Gating of steering signals through phasic modulation of reticulospinal neurons during locomotion. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2014 Mar 4;111(9):3591–6.

15. Сирота М.Г., Шик М.Л. Физиол. ж. им. Сеченова. 1973. 59(9). 131–21.

И.А. СМІРНІТСКАЯ

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва
i.a.i.a@mail.ru

ПАВЛОВСКО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС И СИСТЕМА, УПРАВЛЯЮЩАЯ ПОВЕДЕНЧЕСКИМ ВЫБОРОМ

Приведен обзор исследований Павловско-инструментального переноса. Описано участие в нем дорсального и вентрального стриатума, базолатерального и центрального ядер миндалины. Приведены данные о различии вклада ядра и скорлупы прилежащего ядра в осуществление общего и специфического Павловско-инструментального переноса. Обсуждается различие влияний дорсомедиального и дорсолатерального отделов дорсального стриатума в целенаправленное и рутинное типы поведений.

Ключевые слова: *условные рефлексy, вентральный стриатум, дорсальный стриатум, прилежащее ядро, миндалина, дофамин.*

Введение

И.П. Павлов заложил основу исследования обучения, обнаружив в своих опытах на собаках, что если определенный сигнал (так называемый условный сигнал) всегда предшествует даже вознаграждения, то собака запоминает это, и реагирует на сигнал, как на саму награду, заранее выде-

ляя желудочный сок. Скиннер изменил постановку опытов Павлова: между подачей условного сигнала и дачей вознаграждения животное должно было выполнить какое-то действие – «заработать» награду [1]. Современные исследователи условных рефлексов подчеркивают различие двух видов обучения, называя первый тип Павловскими условными рефлексами, а второй тип – инструментальными условными рефлексами.

Раньше считалось, что запоминание локализовано в коре головного мозга. Теперь ясно, что в запоминании участвует не только кора, но и подкорковые области, которые прежде считали связанными только с эмоциями и называли лимбической системой. К лимбической системе относят миндалину, гиппокамп, гипоталамус. В последние 20 лет в группе «подкорковых ядер» особо выделяют базальные ганглии. В то время как главные нейроны коры возбудительные, глутаматергические, базальные ганглии состоят из тормозных, ГАМКергических нейронов. Базальные ганглии являются необходимым «колесиком» передачи сенсорной информации от органов чувств через таламус к коре. Если это колесико «не крутится», как в случае болезни Паркинсона, то кора в одиночку не работает, человек не может свободно двигаться, или, в тяжелых случаях, вообще осуществлять двигательный акт.

Базальные ганглии влияют на таламус путем, так называемого растормаживания: выходная часть базальных ганглиев тормозит таламус, препятствуя передаче через него сенсорного сигнала в кору, но если возбудить, тоже тормозную, входную часть базальных ганглиев, то она затормозит выходную часть, эти два последовательных торможения дадут возможность таламусу возбудить кору. Подробно о механизме работы базальных ганглиев можно прочитать в [2].

Чрезвычайно важным для функционирования базальных ганглиев игроком является нейромедиатор дофамин. Через специальные, имеющиеся в базальных ганглиях и коре рецепторы, он тормозит или, наоборот усиливает (модулирует) передачу сигналов, осуществляемую другими нейромедиаторами, такими как глутамат или ГАМК. При отсутствии дофамина базальные ганглии не работают. Именно прекращение синтеза дофамина является причиной болезни Паркинсона. Различают текущий, фоновый (тонический) режим выброса дофамина (он важен при болезни Паркинсона), и связанный с внешними, требующими внимания событиями (фазический). В этом, последнем режиме, дофамин влияет на запоминание внешних событий. Усиленный выброс его происходит в ответ на важные внешние события [3], или неожиданные [4].

У позвоночных животных синтез дофамина для нужд базальных ганглиев и коры осуществляется в специальных областях среднего мозга, –

компактной части черной субстанции и вентральном поле покрышки. Понятно, что, будучи необходимой частью функционирования главной, занимающейся запоминанием, области мозга позвоночных, – коры больших полушарий, непрерывно происходящий выброс дофамина должен контролироваться теми же областями, которые командуют поведением животного. Ведь запоминание – это фиксация наилучшего варианта поведения.

Описанная выше система, ядром которой являются базальные ганглии, образует виток передачи сигнала: таламус-кора-базальные ганглии-таламус-кора [5]. Система устроена топическим образом: каждая область коры получает сигнал от своего ядра таламуса, и посылает сигнал в свою часть базальных ганглиев. Важно, что одна часть этой системы выделенная, – это так называемый вентральный стриатум (точнее, его главная часть, называемая прилежащим ядром), он управляет прохождением сигнала по всем другим виткам этой системы. Происходит это за счет воздействия вентрального стриатума на выброс дофамина. Кроме вентрального стриатума на выброс дофамина влияют некоторые ядра миндалины [6], и другие области. Современные исследователи условных рефлексов изучают, как в разных типах поведения/запоминания работают разные части стриатума, миндалины, коры.

Павловско-инструментальный перенос. Описание задачи

Общая схема опытов по Павловско-инструментальному переносу (Pavlovian to instrumental transfer, PIT) включает 3 стадии [7] (рис. 1). Первая стадия – Павловская, когда животное (крыса) приучается связывать какой-то сигнал с тем, что в кормушке появляется корм.

Вторая стадия – инструментальная – крыса помещается в камеру, в которой имеется рычаг, и если она нажимает на рычаг, то получает такой же корм, как и в первой стадии. Когда крыса хорошо обучается нажимать на рычаг, производят угашение этого навыка, а именно, ее помещают в ту же камеру, где она начинает делать то, чему ее обучили – нажимает на рычаг, но корм не получает. После нескольких опытов по угашению крыса начинает нажимать на рычаг реже, чем сразу после обучения. Тогда наступает третья стадия – Павловско-инструментальный перенос: крыса помещается в камеру с рычагом, и дается тот же сигнал, что и в первой стадии, то есть впервые происходит одновременное предъявление сигнала и рычага. Крыса сразу же начинает нажимать на рычаг гораздо чаще. Сравнивая число нажатий в стадии угашения и в стадии переноса, оценивают степень выраженности Павловско-инструментального переноса.

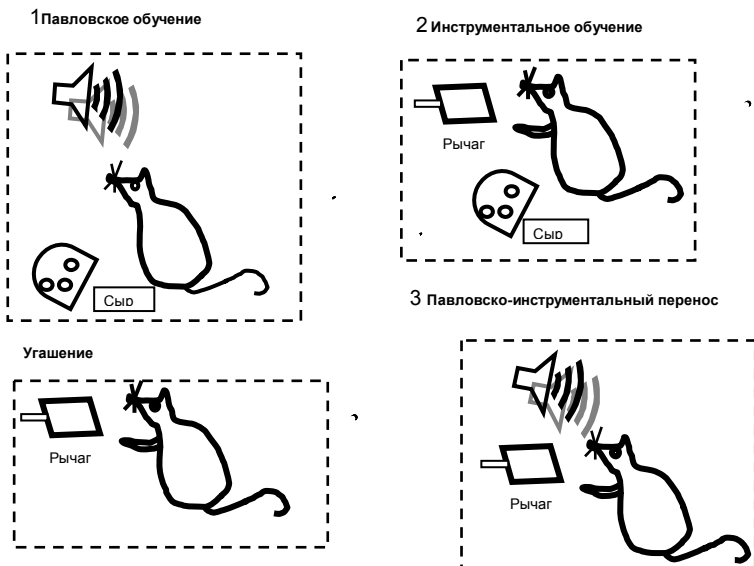


Рис. 1 Схема опытов по Павловско-инструментальному переносу.

В данном случае показаны опыты с общим переносом.

Стадия 1 – павловское обучение. Подача условного (звукового сигнала) подкрепляется пищей. Стадия 2 – инструментальное обучение.

Нажатие на рычаг с пищевым подкреплением. После выработки навыка нажавия производят его угашение. Третья стадия – Павловско-инструментальный перенос.

При подаче условного сигнала животное нажимает на рычаг чаще, чем после угашения

Различают общий и специфический РИТ. Вышеописанная схема соответствует общему переносу. Специфический перенос происходит, если животное в первой стадии выучивает, что два разных сигнала связаны с появлением двух разных типов подкрепления, например, одна награда это гранула сухого корма, а другая – сахарный сироп. Во второй, инструментальной стадии, крыса обучается нажимать на левый рычаг за гранулу сухого корма, а на правый рычаг – за глоток сахарного сиропа. В третьей фазе крысе, помещенной в камеру с двумя рычагами, по очереди предъявляют условные сигналы из первой Павловской стадии. Об успешном осуществлении переноса свидетельствует то, что крыса нажимает на рычаг, подкреплявшийся в стадии 2 той же самой наградой, которая выдавалась при предъявлении данного условного сигнала в первой стадии.

Другая постановка задачи [8] дает возможность оценить для одного и того же животного выполнение и общего, и специфического переноса, а именно: в первой стадии крыса выучивает, что предъявление каждого из 3-х разных сигналов приводит к появлению трех типов положительных наград. Во второй стадии крысу помещают в камеру с двумя рычагами, нажатие на каждый вознаграждается одной из использованных в первой стадии наград. В третьей стадии животному предъявляется тот из выученных в первой стадии сигналов, который не был задействован во второй стадии. Если крыса начинает нажимать то на левый, то на правый рычаги, и общее число нажатий у нее выше, чем до всякого обучения, то считают что произошел общий перенос. Если же в третьей стадии ей предъявляют один из стимулов, использованных во второй стадии, стадии инструментального обучения, и она нажимает на рычаг, подкреплявшийся во второй стадии наградой, использованной для этого стимула в первой стадии, то считают, что произошел специфический перенос.

Удаление каких структур препятствует осуществлению общего и специфического РИТ

В главной части вентрального стриатума, прилежащем ядре, (nucleus accumbens) различают ядро (core) и скорлупу (shell). Обе части прилежащего ядра состоят преимущественно из тормозных нейронов. Нейроны скорлупы по сравнению с нейронами ядра, содержат меньше шипиков, образуют меньше контактов, но имеют более разветвленные связи (у мыши). Скорлупу прилежащего ядра считают входящей в состав так называемой расширенной миндалины. Удаление скорлупы (shell) прилежащего ядра убирает специфический перенос, общий перенос сохраняется [9]. Удаления ядра (core) уменьшает эффект общего переноса, сохраняя специфический. Важно, что эти удаления не влияют на осуществление самих Павловских и инструментальных рефлексов (описанные выше как стадии 1 и 2).

Кроме прилежащего ядра, на РИТ оказывают влияние ядра миндалины: удаление базолатерального ядра убирает специфический РИТ, не влияя на общий [10], а удаление центрального ядра, наоборот, исключает общий перенос, не влияя на специфический. Что касается базолатерального ядра, то его влияние на РИТ обусловлено связями с прилежащим ядром: двусторонне удаление shell дает тот же эффект, что и двустороннее удаление базолатерального ядра миндалины, и тот же, что удаление shell с одной стороны и базолатеральной миндалины с другой стороны.

**Инструментальное обучение и формирование привычек.
Наличие в стриатуме разных зон, управляющих выбором
целевого стимула, обучением инструментальным рефлексам,
автоматическим исполнением выученного**

Когда животное обучается выполнению некоторого действия, за которое оно получает награду, это называют целенаправленным поведением. По мере выучивания поведение становится все более рутинным, переходит в привычку. То есть, если постановка задачи требует, чтобы животное при предъявлении некоторого сигнала совершало определенное действие, то происходит два процесса: сначала внешний сигнал связывается с вознаграждением (Павловское обучение), и, одновременно, внешний сигнал связывается с действием и наградой. В ходе обучения постепенно включается система, связанная с формированием привычки: образуется связь «внешний сигнал-ответное действие». Оказалось, что базальные ганглии состоят из трех частей, – вентральный стриатум, это входная часть системы, оценивающей возможность внешнего сигнала сигнализировать о награде (находит т.н. ценность этого сигнала), остальная часть стриатума – дорсальный стриатум занят выработкой действий. Дорсальный стриатум тоже делится на две части: дорсомедиальный стриатум занят разучиванием действия, ориентируясь на возможность получения награды. Если за совершение действия награда не поступает, то вероятность совершения действия уменьшается. Дорсолатеральный стриатум включается в поздней фазе обучения, когда дорсомедиальный уже выяснил, что действие правильное. Дорсолатеральный стриатум устанавливает прямую, не опосредованную наградой связь «внешний сигнал-ответное действие». В работе [11] обнаружено, что если крысу, приученную при подаче звукового сигнала нажимать на рычаг и получать вознаграждение, накормить досыта, так, что эта еда уже не будет вознаграждением, то все равно, услышав сигнал, крыса побежит нажимать на рычаг. В этом случае говорят о формировании привычки (*habit*).

Обсуждение

Опыты по Павловско-инструментальному переносу демонстрируют действие той подсистемы мозга, которая нацелена не на обучение (обучением занимаются другие подсистемы мозга, управляющие разучиванием Павловских или инструментальных рефлексов). Совокупность структур, участвующих в Павловско-инструментальном переносе, выполняет роль запуска действия в ответ на предъявление ранее встречавшихся, уже выученных внеш-

них сигналов. Можно предполагать, что эта система имеет более древнее происхождение по сравнению с теми системами, которые заняты обучением. В более древних вариантах этой системы роль пускового внешнего сигнала могли играть какие-то врожденно распознаваемые объекты.

Существующая у современных позвоночных животных сложная система кора-базальные ганглии, управляющая выбором действия, которое надо совершить, делится на две подсистемы: дорсальный стриатум обучается действию, совершение которого оптимально для данного внешнего сигнала, вентральный стриатум (прилежащее ядро) оценивает правильность реагирования именно на этот внешний сигнал. Дорсальный стриатум в свою очередь, делится на две части: дорсомедиальный стриатум занят выбором действия, что соответствует ранней фазе обучения, дорсолатеральный стриатум занят разучиванием и последующим «бездумным» исполнением этого действия. Точно так же (достаточно грубо) можно считать, что вентральный стриатум делится на две части: скорлупа (shell) прилежащего ядра занята оценкой, выбором внешней цели с учетом тонких различий, таких как разные типы внешних сигналов и ответных действий (специфический РИТ), ядро (core) руководит исполнением переноса без учета тонких различий (общий РИТ). Базолатеральное ядро миндалина, удаление которого препятствует специфическому переносу известно своим участием в обучении распознаванию внешних сигналов [16], и опосредованным влиянием на выброс дофамина вентральным полем покрышки. Центральное ядро миндалина, удаление которого препятствует общему переносу, оказывает воздействие на выброс дофамина компактной частью черной субстанции [6]. Области которые получают «дофаминовое снабжение» от компактной части черной субстанции являются как дорсолатеральный стриатум [6], так и область core прилежащего ядра [12].

Заключение

Может показаться, что изучение условных рефлексов является частным вопросом, относящимся к особенностям поведения животных. Однако, система управления поведенческим выбором, главной частью которой является комплекс структур, управляющих выбросом дофамина, – это центральная подсеть мозга, одинаковая у мыши и человека.

Наличие РИТ показано у человека [13]. В одном из опытов [14] участники эксперимента сначала обучались выполнению действия: нажимали одну из трех кнопок клавиатуры и получали пищевое вознаграждение (один из трех видов снеков) – инструментальное обучение. Затем они проходили курс Павловского обучения: при предъявлении на экране од-

ного из трех видов фракталов получали для каждого свой из трех видов снеков. Кроме того, дополнительный четвертый фрактал был «пустой» – за появлением на экране этого фрактала никакой награды не поступало. В фазе переноса им предъявляли фрактал и разные комбинации из двух кнопок клавиатуры. Успешность специфического переноса оценивали по частоте нажатия кнопки, соответствующей своему фракталу (вознаграждаемому тем же снеком, что и нажатие данной кнопки). Успешность общего переноса оценивали по частоте нажатия вознаграждаемой кнопки по сравнению с частотой нажатия «пустой» кнопки. Одновременно мозг участника сканировали с помощью магнитно-резонансного томографа высокого разрешения. Было обнаружено, что активность вентролатеральной области хвоста стриатума и базолатеральной части миндалины была повышена при успешном выполнении специфического переноса, а активность центромедиальной части миндалины повышена при успешном выполнении общего переноса.

Система управления поведенческим выбором нарушена у наркоманов и при алкоголизме. В опытах [15] показано, что выраженность эффекта переноса может быть индикатором риска возврата к злоупотреблению алкоголем.

Модельные поведенческие задачи, такие как Павловско-инструментальный перенос, или формирование привычек помогают прояснить механизмы взаимодействия структур мозга в норме и патологии.

Список литературы

1. Skinner B.F. The Behavior of Organisms: An Experimental Analysis. New York: Appleton-Century-Crofts, 1938.
2. Silkis I. The cortico-basal ganglia-thalamocortical circuit with synaptic plasticity. II. Mechanism of synergistic modulation of thalamic activity via the direct and indirect pathways through the basal ganglia. *Bio Systems*. 2001, 59(1): 7–14.
3. Schultz W., Dayan P., Montague P.R. A neural substrate of prediction and reward. *Science*. 1997 Mar 14; 275(5306):1593–9.
4. Costa V.D., Tran V.L., Turchi J., Averbeck B.B. Dopamine modulates novelty seeking behavior during decision making. *Behav Neurosci*. 2014 Oct; 128(5):556–66.
5. Alexander G.E., Crutcher M.D. Functional architecture of basal ganglia circuits: neural substrates of parallel processing. *Trends Neurosci* 1990; 13: 266–271.
6. Nura W., Lingawi, Bernard W. Balleine Amygdala central nucleus interacts with dorsolateral striatum to regulate the acquisition of habits.
7. Corbit L.H., Balleine B.W. Learning and Motivational Processes Contributing to Pavlovian–Instrumental Transfer and Their Neural Bases: Dopamine and Beyond. *Curr Topics Behav Neurosci*, 2016; 27:259–89.

8. Corbit L.H., Balleine B.W. Double dissociation of basolateral and central amygdala lesions on the general and outcome-specific forms of Pavlovian-instrumental transfer. *J Neurosci* 2005. 25:962–970.
9. Corbit L.H., Balleine B.W. The general and outcome-specific forms of Pavlovian – Instrumental transfer and are differentially mediated by the nucleus accumbens core and shell. *J Neurosci*. 2011. 31:11786–11794.
10. Blundell P., Hall G., Killcross S. Lesions of the basolateral amygdala disrupt selective aspects of reinforcer representation in rats. *J Neurosci*. 2001. 21(22):9018–9026.
11. Dickinson A., Nicholas D., Adams C.D. The effect of the instrumental training contingency on susceptibility to reinforcer devaluation. *J Exp Psychol*. 1983. 35:35–51.
12. Salgado S., G. Kaplitt M.G. The Nucleus Accumbens: A Comprehensive Review. *Stereotact Funct Neurosurg*. 2015. 93^75–93.
13. O’Doherty J.P. Multiple Systems for the Motivational Control of Behavior and Associated Neural Substrates in Humans *Curr Topics Behav Neurosci*. 2016;27 291–312.
14. Prevost C., Liljeholm M., Tyszka J.M., O’Doherty J.P. Neural correlates of specific and general Pavlovian-to-Instrumental Transfer within human amygdalar subregions: a high-resolution fMRI study. *J Neurosci*. 2012; 32:8383–8390.
15. Garbusow M., Schad D.J., Sommer C., Jünger E., Sebold M., Friedel E., Wendt J., Kathmann N., Schlagenhauf F., Zimmermann U.S., Heinz A., Huys Q.J., Rapp M.A. Pavlovian-to-instrumental transfer in alcohol dependence: a pilot study. *Neuropsychobiology*. 2014. 70:111–121.
16. Morrison S.E., Salzman C.D. Re-valuing the amygdala *Curr Opin Neurobiol*. 2010, 20(2): 221–230.

**В.И. ЧЕРНОИВАНОВ, С.К. СУДАКОВ,
Г.К. ТОЛОКОННИКОВ**

Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П.К. Анохина
РАМН, Москва
admcit@mail.ru

**КАТЕГОРНАЯ ТЕОРИЯ СИСТЕМ,
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ И БИОМАШСИСТЕМ.
ЧАСТЬ I**

Обсуждается категорный подход к теории систем, функциональных систем, применяемый в теории биомашсистем. Поставлены задачи включения биомашсистем в теорию функциональных систем, на основе категорного подхода, на базе которого развивается теория биомашсистем. Приведены точные математические результаты моделей, касающиеся дуальности полиграфов, которые образуют нейроны и их связи.

Ключевые слова: *теория систем, функциональные системы, биомашсистемы, поликатегории, дуальность, решатель, системообразующий фактор.*

Введение

Теория систем возникла в работах Л. Берталанфи и оформилась как отдельная наука с выходом книг М. Месаровича с соавторами [1] и [2]. П.К. Анохиным [3] в основы теории систем введён системообразующий фактор, превративший теорию систем в действенный инструмент работы исследователей.

Теория систем и теория функциональных систем широко известны (ниже указаны некоторые продвижения в теории функциональных систем).

В последние годы появилась теория [4–7] биомашсистем, уходящая корнями в теорию эргатических систем. Биомашсистемы возникли как конструктивный ответ на современные проблемы сельскохозяйственного машиностроения и других машиностроительных отраслей, включающие обостряющуюся ситуацию с фактическим затруднением операторов машин (комбайнеров и др.) оптимально управлять усложняющимися машинами и механизмами. Основная задача устранения негативного в «человеческом факторе» эргатических систем состоит в резком повышении автономности интеллектуальных систем управления машинами.

Предлагается общий категорный подход к теории систем, биомашсистем и функциональных систем, в рамках которого, в частности, формализуется системообразующий фактор П.К. Анохина.

Биомашсистемы и функциональные системы

Термин «эргатическая система» был принят в 1960 г. на Первом конгрессе Международной федерации по автоматическому управлению с целью обозначения систем, включающих человека, который функционирует в совокупности с комплексом технических средств. Позднее содержание данного понятия расширилось, в аграрной отрасли акцент был перенесён на учёт наличия в агропроизводстве не просто человека и машины, но и продуктивного животного (см., например, [8]), перешли к системе «человек-машина-животное».

Включение в эргатическую систему целевого объекта «животное» – продуктивного животного приблизило понятие эргатической аграрной системы к понятию функциональной системы по П.К. Анохину. Осознание кажущихся уже непреодолимыми в традиционных рамках указанных

выше трудностей привело к обобщенному понятию эргатических систем ([9]), к треугольной триаде «человек-машина-живое» и далее к биомашсистемам [4] и парадигме биомашсистем [5].

В теории биомашсистем основной упор делается на изучении с дальнейшим использованием связей отдельных элементов, связей между связями, и т.д., что выливается с точки зрения математического моделирования биомашсистем в распространение категорного подхода, известного в математике.

Формализованное моделирование систем управления, как правило, представляет собой тот или иной раздел искусственного интеллекта, конструктивной основой которого традиционно является наличие решателей, осуществляющих поиск вывода в пространстве состояний системы из начального состояния в целевое.

В теории биомашсистем применяются новые виды решателей, названные «блоком Поста» и «биоблоком» и основанные на новых методах нейробионики, теории поликатегорий, гиперграфовых конструкций и их исчислений [6, 7, 10]. Существенным аспектом предлагаемых бионических моделей является гиперграфовая модель неокортекса млекопитающих [10] и в последних исследованиях нейрографовая модель сети живых нейронов, в которой предыдущая модель является подмоделью [6, 7].

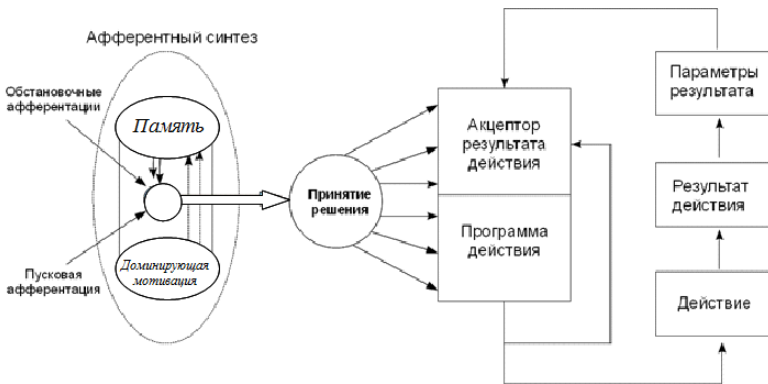


Рис. 1. Архитектура функциональной системы по П.К. Анохину

Биомашсистемы являются функциональными системами по П.К. Анохину, поскольку содержат системообразующий фактор как обязательный элемент.

Возникает задача интеграции теории биомашсистем и теории общих функциональных систем, результат может оказаться полезен для обеих теорий, с одной стороны, теория биомашсистем реально начнёт использовать результаты, имеющиеся для функциональных систем, а в функциональных системах возникнет, в частности, вариант формализации, связанный с категорным подходом, используемым в биомашсистемах. Более того, включение биомашсистем в теорию функциональных систем является тем важным развитием теории функциональных систем в других областях науки и техники, на которое указывал П.К. Анохин [3].

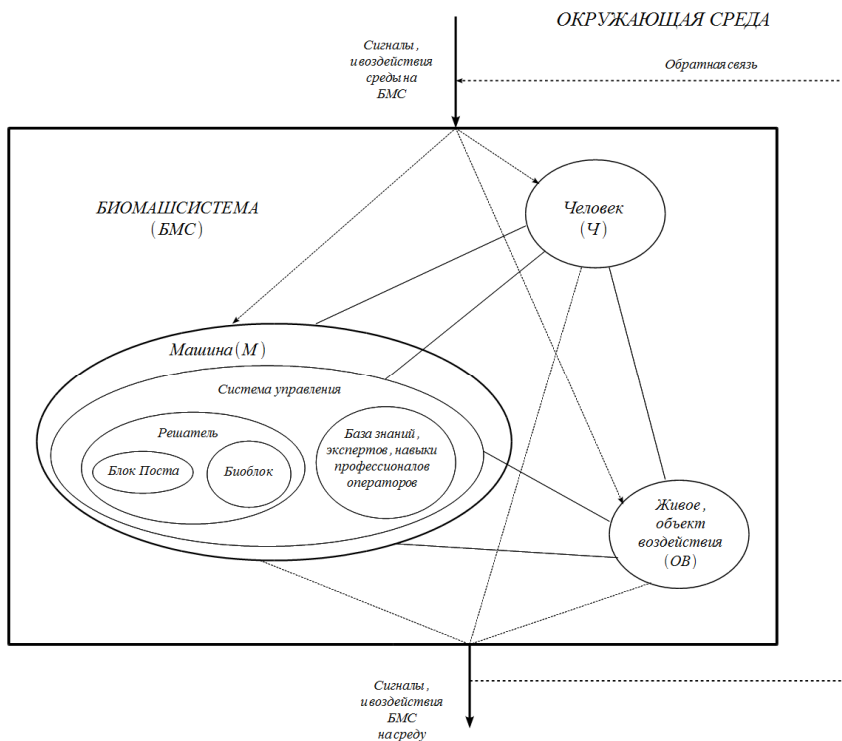


Рис. 2. Биомашсистема

Общая архитектура функциональной системы задаётся известной схемой, данной П.К. Анохиным (см. рис. 1).

Важно отметить, что биомашсистемы могут быть описаны также схемой (см. рис. 3), отражающей однотипную организацию различных функ-

циональных систем, описанной П.К. Анохиным для поддержания гомеостатических показателей живого организма [11]. При этом системообразующим результатом в биомашсистемах может быть определенный объем сельскохозяйственной продукции, в эффекторную часть входит совместная работа механизмов и работников, а в качестве обратной афферентации к управляющему органу принимается организованный контроль и мониторинг проводимых работ.

Научное направление функциональных систем продолжили ученики и последователи П.К. Анохина, в том числе, в рамках работы НИИ нормальной физиологии [11].

Среди значительных, ставших уже классическими продвижений следует указать на мультипараметрический принцип взаимодействия функциональных систем, системное квантование физиологических процессов.

В последнее время появился развиваемый К.В. Анохиным подход, названный «когнитомом», как продолжение теории функциональных систем [12].

Формализация и моделирование функциональных систем представляет весьма непростую задачу [13], тем не менее, появились успешные математические модели [14], однако, остаются не разработанными вопросы взаимосвязей с системными подходами в искусственном интеллекте и получившей значительное развитие общей теории систем.

На одну из причин указывал в связи с этим еще П.К. Анохин, подчеркивая, что в имеющихся подходах нейроны настолько упрощены, что их модели отстают от экспериментальной науки на десятилетия [3].

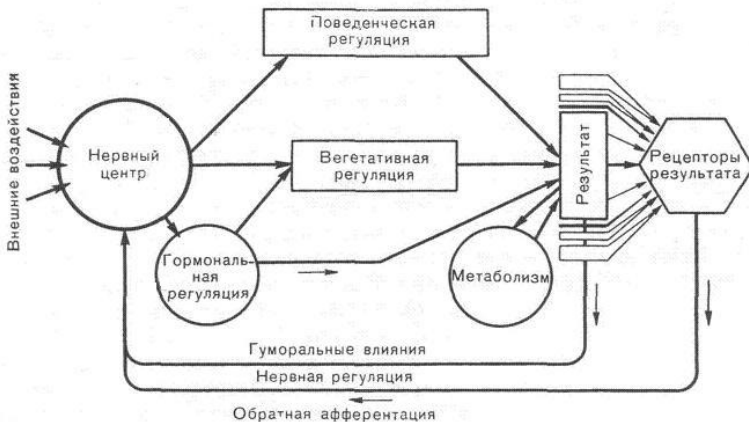


Рис. 3. Однотипная организация функциональных систем

Категорные модели нейронов и их сетей

В последние годы появились подходы с более сложными и адекватными моделями нейронов и нейронных сетей, сюда можно отнести НТМ-технологию Дж. Хокинса, а также глубоко развитую ААУ-модель А.А. Жданова (модель автономного адаптивного управления [15]).

Здесь нейрон нагружен значительными функциями, включающими, в частности, распознавание образов, но сетевая структура остается традиционной.

Как функциональные системы, так и биомашсистемы опираются на представления о нейронах и их сетях. В развиваемом подходе положение с моделированием нейронов кардинально исправлено, в том числе по сравнению с упомянутыми подходами Дж. Хокинса и А.А. Жданова, нейроны и их сети, а также их иерархическая организация в неокортексе адекватно моделируются новыми развиваемыми нашими специалистами математическими объектами нейрографами, гиперграфовыми математическими конструкциями и новым видом исчислений, названным исчислениями гиперграфовых конструкций [6, 7, 10].

Основная идея состоит в переходе от традиционного рассмотрения нейронов и связей между ними, как объектов и стрелок к модели нейронов в виде полистрелок с возможностью их соединений, соответствующих поликатегорным соединениям и высшим категорным соединениям. В результате возможности моделирования и описания свойств кардинально увеличиваются. Представляя нейроны в виде полистрелок и моделируя самые разнообразные возможные связи между нейронами-полистрелками с помощью других нейронов-полистрелок, мы получаем, так называемый, *нейрограф*, как новое математическое понятие. Подобная абстракция включает помимо обычно рассматриваемой синаптической связи нейронов, также и другие известные (и неизвестные пока) связи, электрические синапсы, нанотрубочки, лиганды и экзосомы (как виды «отложенной» связи), возможные по Пенроузу-Хамероффу квантовые и сверхквантовые когерентные виды связи. Представив нервную систему и мозг в виде гигантского нейрографа следует указать, что сеть называется сам нейрограф с учетом трафика проходящих по связям сигналов (спайков и т.п.). Подобная нейрографовая сеть может служить моделью также и для когнитивных потоков, быть единой сетью физиологических и ментальных процессов, как это принято в концепции когнитива К.В. Анохина. *Вторая ключевая идея* относится к иерархическим подструктурам мозга, таким как неокортекс. Нейрограф мозга имеет подструктуры, в частности, свёрточные поликатегории и гиперграфовые конструкции, которые моделируют иерархию и порождаемые ею

свойства (память, инвариантные представления и т.п.). Здесь важнейшим элементом служат исчисления гиперграфовых конструкций, обеспечивающие моделирование вычислительных процессов в мозге, что использовано в моделях решателей для биомашсистем.

Во второй части доклада перейдём к точным формулировкам, опираясь на книги [4, 5, 10], в которых заложен категорный формализм рассматриваемого подхода и дано категорное обобщение теории систем, включая формализацию системообразующего фактора по П.К. Анохину.

Заключение

Биомашсистемы, функциональные системы и системы по М. Месаровичу рассмотрены в рамках единого категорного подхода.

С помощью формализма сверточных поликатегорий удаётся дать обобщение теории систем с включением и формальным описанием системообразующего фактора по П.К. Анохину. Нейрон является системой в категорном смысле, различные соединения нейронов моделируются свертками поликатегорий, а системообразующий фактор преобразует с помощью эндифунктора набор исходных систем, применяет к преобразованным системам соответствующую свертку, превращая их в подсистемы вновь образованной составной системы. В частности, такой системой, уже в строго математическом смысле является мозг млекопитающих и человека.

Выводы

Дано категорное определение системы, далеко обобщающее известное определение систем по М. Месаровичу. Даны определения и основные свойства сверточных поликатегорий, сформулированные в виде теорем, в частности, описывающие новые виды дуальности и принцип двойственности для сверточных поликатегорий, являющийся аналогом принципа двойственности для теории категорий, доказанного Хетчером в [18].

В рамках категорных систем даны описания стратификации, слоев и эшелонов, а также системообразующего фактора П.К. Анохина. В ближайшие планы входит установление математических взаимосвязей систем, функциональных систем и биомашсистем на категорном уровне.

Математическая реализация изложенных идей представлена во второй части доклада.

Литература

1. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
2. Месарович М., Такахара И. Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978. 311 с.
3. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. В сб. «Принципы системной организации функций». М., 1973. С. 5–61.
4. Черноиванов В.И., Гулюкин М.И., Толоконников Г.К. Бионический подход к решению проблемы автономности систем управления животноводческих производств // Вестник ВНИИМЖ. 2015. № 3(17). С. 76–91.
5. Черноиванов В.И., Савченкова И.П., Толоконников Г.К. Парадигма биомашсистем // Вестник ВНИИМЖ. 2016. № 2(22). С. 56–61.
6. Черноиванов В.И. (ред.). Биомашсистемы. Теория и приложения. Т. 1 / Под ред. акад. В.И. Черноиванова. М.: Росинформагротех, 2016. 230с.
7. Черноиванов В.И. (ред.). Биомашсистемы. Теория и приложения. Т. 2 / Под ред. акад. В.И. Черноиванова. М.: Росинформагротех, 2016. 241с.
8. Карташов Л.П., Соловьев С.А. Повышение надежности системы «человек-машина-животное». Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 275 с.
9. Черноиванов В.И. Ресурсосбережение и машины с элементами человеческого интеллекта – ответ на кризисные вызовы современности и будущего // Прикл. матем., квант. теория и программ. 2013. Т. 10. № 3. С. 9–19.
10. Толоконников Г.К. Вычислимые и невычислимые физические теории по Р. Пенроузу. Ч. 3 // Прикл. матем., квант. теория и программ. 2012. Т. 9. № 4. С. 3–294.
11. Судяков К.В. Общая теория функциональных систем. М., 1984. 224 с.
12. Анохин К.В. Когнитом: в поисках общей теории когнитивной науки. Шестая международная конференция по когнитивной науке. Калининград, 2014. С. 26–28.
13. Редько В.Г. От моделей поведения к искусственному интеллекту. М.: Лепант, 2014. 460 с.
14. Мухортов В.В., Хлебников С.В., Витяев Е.Е. Улучшенный алгоритм семантического вероятностного вывода в задаче 2-мерного анимата // Нейроинформатика. 2012. Т. 6. № 1. С. 50–62.
15. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. М.: Бином, 2012. 359 с.
16. Мендельсон Э. Введение в математическую логику. М., 1984. 320 с.
17. Мальцев А.И. Алгебраические системы. М.: Наука, 1970. 345 с.
18. Hatcher W.S. The logical foundations of mathematics. PERGAMON PRESS, 1982. 320 p.

**В.И. ЧЕРНОИВАНОВ, С.К. СУДАКОВ,
Г.К. ТОЛОКОННИКОВ**

Научно-исследовательский институт нормальной физиологии им. П.К. Анохина
РАМН, Москва
admcit@mail.ru

**КАТЕГОРНАЯ ТЕОРИЯ СИСТЕМ,
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ И БИОМАШСИСТЕМ.
ЧАСТЬ 2**

Обсуждается категорный подход к теории систем, функциональных систем, применяемый в теории биомашсистем. Поставлены задачи включения биомашсистем в теорию функциональных систем, на основе категорного подхода, на базе которого развивается теория биомашсистем. Приведены точные математические результаты моделей, касающиеся дуальности полиграфов, которые образуют нейроны и их связи.

Ключевые слова: *теория систем, функциональные системы, биомашсистемы, поликатегории, дуальность, решатель, системообразующий фактор.*

Введение

Теория систем возникла в работах Л. Бергаланфи и оформилась как отдельная наука с выходом книг М. Месаровича с соавторами [1] и [2]. П.К. Анохиным [3, 11] в основы теории систем введён системообразующий фактор, превративший теорию систем в действенный инструмент работы исследователей.

Теория систем и теория функциональных систем широко известны (ниже указаны некоторые продвижения в теории функциональных систем).

В последние годы появилась теория [4–7] биомашсистем, уходящая корнями в теорию эргатических систем [8]. Биомашсистемы возникли как конструктивный ответ [9] на современные проблемы сельскохозяйственного машиностроения и других машиностроительных отраслей, включающие обостряющуюся ситуацию с фактическим затруднением операторов машин (комбайнеров и др.) оптимально управлять усложняющимися машинами и механизмами. Основная задача устранения негативного в «человеческом факторе» эргатических систем состоит в резком повышении автономности интеллектуальных систем управления машинами.

Предлагается общий категорный подход к теории систем, биомашин и функциональных систем, в рамках которого, в частности, формализуется системообразующий фактор П.К. Анохина.

В первой части доклада дана идейная сторона вопроса, здесь приводится математическая реализация указанных идей.

Теория систем по М. Месаровичу

Напомним сначала кратко основные определения теории систем [1, 2].

Определение. Пусть заданы два множества: множество X входов и множество Y выходов. Тогда *системой* S , или *системой по Месаровичу*, называется отношение на декартовом произведении $S \subseteq X \times Y$. Как и в [1, 2], будем использовать функциональные обозначения $S: X \rightarrow Y$.

Если задана совокупность S систем S_i , причём индексное множество $\langle S, \langle \rangle$ частично упорядочено, тогда пара $(S, \langle \rangle)$ называется *иерархией* систем.

Выделяется три вида иерархии систем, стратификация, слои и эшелоны.

Стратификация. Если $X = X_1 \times \dots \times X_n$ и $Y = Y_1 \times \dots \times Y_n$, то i -й *стратой* системы S называется система S_i :

$$\begin{aligned} S_n &: X_n \times W_n \rightarrow Y_n; \\ S_i &: X_i \times L_i \times W_i \rightarrow Y_i, \quad 1 < i < n; \\ S_1 &: X_1 \times L_1 \rightarrow Y_1, \end{aligned}$$

имеются сюръекции $h_i: Y_i \rightarrow W_{i+1}$, $c_i: Y_i \rightarrow L_{i-1}$, такие, что

$$\begin{aligned} y_n &= S_n(x_n, h_{n-1}(y_{n-1})); \\ y_i &= S_i(x_i, c_{i+1}(y_{i+1}), h_{i-1}(y_{i-1})); \\ y_1 &= S_1(x_1, c_2(y_2)). \end{aligned}$$

L_i, W_i – множества стимулов; h_i – информационная функция i -й страты, распределительная функция i -й страты.

Система S в этом случае называется *стратифицированной системой*.

Слои. Если система S может быть представлена подсистемами $S_i: M_i \rightarrow M_{i-1}$, то эти подсистемы называются *слоями системы* S .

Эшелоны. В иерархии, составленной из упорядоченных по номерам 1, 2, 3, ..., n страт или слоёв, на каждом уровне $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$ находится по

одной подсистеме, в случае эшелонной иерархии на каждом уровне может присутствовать по несколько подсистем. В этом случае уже нет строго порядка на множестве индексов I . В соответствии с упорядоченностью в I имеем следующие эшелоны $J^{(1)}, \dots, J^{(k)}, \dots$, на которые разбивается исходная система:

$J^{(1)} = \{S_i | i \in I_1\}$, I_1 – набор минимальных элементов в I ; ...; $J^{(k)} = \{S_i | i \in I_k\}$, I_k – набор минимальных элементов в $I - \{I_1 \cup \dots \cup I_{k-1}\}$ и т.д.

Определение закончено.

Ниже приводится категорное обобщение понятия систем и их иерархий по Месаровичу.

Системообразующий фактор по П.К. Анохину

Основная идея П.К. Анохина, достраивающая теорию систем, состоит в том, что по совокупности систем из них может быть собрана новая система *только* при наличии системообразующего фактора, имеющего двойственную природу. С одной стороны, фиксируется результат (цель и т.п.) для составной системы, с другой стороны, имеется некоторый «оператор», меняющий соответствующим образом каждую из систем, которые станут в результирующей системе подсистемами. В категорной реализации набор подсистем $\{S_1, \dots, S_n\}$ суть некоторый полиграф, представляющий собой свёрточную предполикатеорию, а системообразующий фактор суть пара $\hat{F} = (F, \circ_F)$, где F – эндофунктор в категории полиграфов, а \circ_F является свёрткой, соответствующей фактору \hat{F} . В частности, иерархии по Месаровичу переходят в соответствующие свертки преобразованных функтором подсистем исходной системы, на чём остановимся после введения поликатегорий.

Формальная теория свёрточных поликатегорий

Опираемся на обычную классическую математическую логику [16] и теорию алгебраических систем [17]. Язык теории свёрточных поликатегорий (с равенством) состоит из: букв полиграфов $p, \dots, q, \dots, r, \dots$ (и они же с индексами); буквы \emptyset ; функциональных символов кообластей C_i ; функциональных символов π_i ; функциональных символов областей D_i ; функциональных символов ω_i ; S_β^α - двуместных предикатов свёрток ($S_\beta^\alpha(p, q)$)

с индексами в виде естественно упорядоченных наборов натуральных чисел. Формулы строятся обычным образом в классическом первопорядковом исчислении предикатов с применением кванторов и связок. За логические аксиомы теорий с равенством возьмём для определённости вариант из книги Мендельсона [16] (с. 65 и 86) и правила вывода из классической логики, включающие модус поненс MP и обобщение Gen .

Обозначим $x_i = \pi_i(p)$, $y_j = \omega_j(p)$, $b_i = C_i$, с каждым полиграфом p связывается формула:

$$\begin{aligned} \varphi(p) &= (x_1 = \pi_1(p) \wedge \dots \wedge x_n = \pi_n(p) \wedge y_1 = \omega_1(p) \wedge \dots \wedge y_m = \omega_m(p) \wedge C_1(p) = \\ &= b_1 \wedge \dots \wedge C_n(p) = b_n \wedge D_1(p) = a_1 \wedge \dots \wedge D_m(p) = a_m \wedge_{w=1}^k (x_{\mu_1^{(w)}} = \\ &= x_{\mu_2^{(w)}} \wedge \dots \wedge x_{\mu_{u(w)-1}^{(w)}} = x_{\mu_u^{(w)}} \wedge x_{\mu_u^{(w)}} = y_{\lambda_1^{(w)}} \wedge y_{\lambda_1^{(w)}} = y_{\lambda_2^{(w)}} \wedge \dots \wedge y_{\lambda_{v(w)-1}^{(w)}} = \\ &= y_{\lambda_{v(w)}^{(w)}} \wedge_{\bar{w}=1}^{\bar{k}} (b_{\bar{\mu}_1^{\bar{w}}} = b_{\bar{\mu}_2^{\bar{w}}} \wedge \dots \wedge b_{\bar{\mu}_{u(\bar{w})}^{\bar{w}}} \wedge b_{\bar{\mu}_u^{\bar{w}}} = a_{\bar{\lambda}_1^{\bar{w}}} \wedge \dots \wedge a_{\bar{\lambda}_{v(\bar{w})}^{\bar{w}}} = a_{\bar{\lambda}_{v(\bar{w})}^{\bar{w}}})) \end{aligned}$$

Полистрелки есть полиграфы с «совпадающими» некоторыми x и y -проекциями. Свертке S_β^α , $(\alpha_1, \dots, \alpha_u)$, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_v)$ сопоставляется формула

$$\wedge_{i=1}^u (C_{\alpha_i}(p) = b_{\alpha_i} \wedge \pi_{\alpha_i}(p) = x) \wedge_j^v (D_{\beta_j}(p) = \alpha_{\beta_j} \wedge \omega_{\beta_j}(p) = y).$$

Полиграфы, для которых определены свёртки, называются *предполикатегориями*. Теперь дадим аксиоматику и определение свёрточных поликатегорий. Свойства свёрток формализованы в аксиомах.

Аксиома 1 весьма громоздка, утверждает, что область от области совпадает с областью (соответственно, кообласть от кообласти), при этом у каждой из областей и кообластей имеется совпадающая с ними всего одна область и, соответственно, одна кообласть и т.п., некоторые из равенств имеют вид (остальные аналогичны):

$$\forall p(C_i(C_j(p)) = C_j(p) \wedge \pi_i(\pi_j(p)) = \pi_j(p));$$

$$\forall p(C_i(p) \neq C_j(p) \supset C_i(C_j(p)) = \emptyset \wedge \pi_i(C_j(p)) = \emptyset).$$

Аксиома 2.

$$\forall p \forall q \forall r (S(p, q) \cap S(p, r) \supset q = r),$$

свёртки единственны, если они определены.

Аксиома 3.

$$\begin{aligned} \pi_{\alpha_i}(p) = x_{\alpha_i} \wedge x_{\alpha_i} \neq \emptyset \wedge C_{\alpha_i}(p) = b_{\alpha_i} \wedge b_{\alpha_i} \neq \emptyset \wedge_{j=1}^m (\omega_{\beta_j}(p) = \\ = y_{\beta_j} \wedge y_{\beta_j} \neq \emptyset \wedge D_{\beta_j}(p) = \alpha_{\beta_j} \wedge \alpha_{\beta_j} \neq \emptyset), \\ \alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_k), \quad \beta = (\beta_1, \dots, \beta_m). \end{aligned}$$

Свёртки существуют тогда и только тогда, когда непусты соответствующие области и кообласти исходного полиграфа. При этом, как для заданной свёртки может иметься несколько полиграфов, на которых она определена, так и для заданного полиграфа может быть несколько выполнимых на нём свёрток.

Аксиома 4.

Определяет действие свёртки S_{β}^{α} на полиграф p с формулой $\varphi(p)$

$$\forall p \forall r (\varphi(r) \wedge S_{\beta}^{\alpha}(r, p) \supset \varphi_{S, r}(p)).$$

Формула $\varphi_{S, r}(p)$ более громоздка, чем определённая выше $\varphi(r)$. Отметим, что для случая категорий для двух стрелок эта аксиома определяет обычную композицию стрелок.

Имеется аналог аксиомы, соответствующий ассоциативности свёрток (композиций), однако в теории нейрографов, частным случаем которых являются свёрточные поликатегории, неассоциативный случай также представляет интерес.

Приведённый формальный язык и аксиомы определяют *формальную теорию свёрточных поликатегорий*. Сами свёрточные поликатегории являются моделями формальной теории в категории множеств *Set* (или других категорных образованиях). Как указывал основатель теории моделей академик А.И. Мальцев [15], сам факт предъявления аксиом теории является весьма ценным математическим результатом, дающим «на автомате» целый ряд свойств определяемых ими объектов. Приведём также важнейший результат (включающий новый вид дуальности), касающийся двойственности или дуальности в свёрточных поликатегориях, играющий, в том числе и для приложений, не менее важную роль, чем двойственность в теории категорий.

Двойственность в теории свёрточных поликатегорий

Пусть дана модель M формальной теории свёрточной поликатегории. Построим, так называемые, дуальные по объектам полиграф и свёрточную поликатеорию M^{ob} .

Формулы, соответствующие полиграфам $p \rightarrow \Delta(p) = q$, связаны указанным на рис. 4 образом.

Другими словами, $p \rightarrow q, C_i \rightarrow \omega_i, \pi_i \rightarrow D_i, D_j \rightarrow \pi_j, \omega_j \rightarrow C_j$ при применении Δ .

Если задана свертка S_β^α , то $b_i \rightarrow \delta_i, x_i \rightarrow \sigma_i, y_j \rightarrow \rho_j, a_j \rightarrow \gamma_j$. Определим дуальную свертку $(S^\Delta)_\beta^\alpha$, как и в исходной с отсутствующими α и β проекциями, именно, $\eta_{S^\Delta} = \Delta(\eta_S)$, а остальные компоненты определим, потребовав коммутативности диаграммы изображенной на рис. 5, где s – унарная частичная операция, соответствующая предикату свертки.

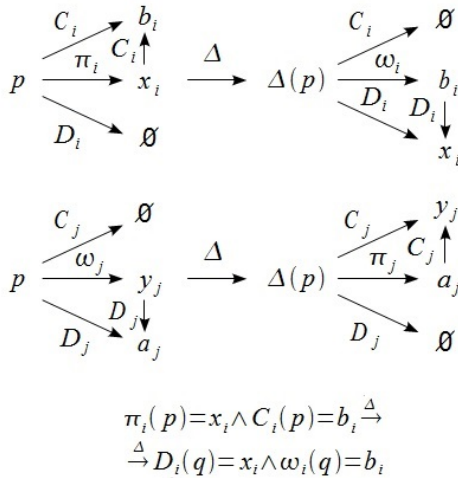


Рис. 4

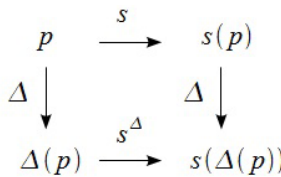


Рис. 5

Естественным образом определяется преобразование формул языка и доказывається перевод правильно построенных формул в правильно построенные формулы.

Аналогично вводится дуальность по полистрелкам, в которой

$$p \rightarrow q, C_i \rightarrow D_i, \pi_i \rightarrow \omega_i, D_j \rightarrow C_j, \omega_j \rightarrow \pi_j,$$

определяется преобразование формул и свертков.

В теории категорий одним из фундаментальных фактов является дуальность: по каждой категории можно построить дуальную категорию, меняя направление всех стрелок на противоположное (дуальность по полистрелкам в нашей терминологии). При этом каждое утверждение о категориях переходит в дуальное утверждение, причём доказывать его уже не нужно, оно и так справедливо согласно установленному Хетчером [16] принципу дуальности, являющемуся краеугольным камнем теории категорий. Аналогичный результат имеет место для обоих видов дуальности в свёрточных поликатегориях [4, 5, 10].

Теорема.

Пусть задана доказуемая правильно построенная формула в формальной теории свёрточных поликатегорий. Тогда дуальная по полиобъектам формула и дуальная по полистрелкам формула также доказуемы в этой теории.

Для сети нейронов, образующих нейрограф (свёрточную поликатеорию), теорему можно проверить на эксперименте. Для этого фиксируем некоторое свойство исходного нейрографа, найдём или экспериментально построим дуальный нейрограф и проверим наличие дуального свойства у дуального нейрографа. Подобно следствиям принципа дуальности в теории категорий, целый ряд следствий дуальности «полистрелка-полиобъект» имеет место в теории нейрографов, используемых в решателях биоблока и блока Поста.

Категорная теория систем

Перейдем к применению свёрточных поликатегорий к теории систем.

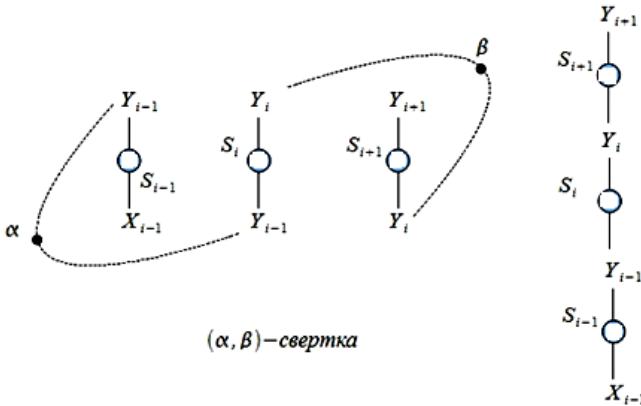
Определение.

Пусть задана свёрточная предполикатегория, как набор полиграфов (полистрелок и др.) и применяемых к ним свёрток. Тогда всякий полиграф называется *категорной системой* или просто *системой*. Система называется *составной*, если она представима в виде свёрток других систем, называемых *подсистемами* исходной системы. Если систему нельзя представить в виде свёртки других систем, то она называется *простой системой*.

Теорема.

Всякая система по Месаровичу является категорной системой с пустым набором свёрток.

Системы, которые М. Месарович представляет в виде иерархии систем (стратифицированные, послонные и эшелонные), в категорном исполнении представляются в виде соответствующих свёрток подсистем.



На рисунке изображена часть из трёх слоев иерархии по слоям. Стратифицированные и эшелонные системы по Месаровичу представляются категорными системами аналогично, с учетом нескольких входов и выходов (для одинаковых выходов вводятся их копии).

Категорный системообразующий фактор

Процедуру соединения систем в качестве подсистем составной системы М. Месарович по существу, не обсуждает, смотрит на составные системы как на данные, можно сказать, не рассматривает динамику реорганизации систем в новые системы в зависимости от изменяющейся внешней и внутренней ситуации. Объективная критика в этом отношении проведена в известных работах П.К. Анохина, обосновавших необходимость введения системообразующего фактора, но не дававших формализации этого понятия. Системообразующий фактор находит естественную модель в категорных системах.

Определение.

Пусть задана совокупность систем $\{S_\alpha, \alpha \in I\}$, I – индексное множество, эндифунктор F в категории систем и свертка Δ . Тогда, если свертка применима к совокупности преобразованных систем $\{FS_\alpha, \alpha \in I\}$, то пара (F, Δ) называется *системообразующим фактором* составной системы $S = \Delta(\{FS_\alpha\})$.

Итак, каждая система имеет набор подсистем и связанный с ней функтор и свертку. Отдельный нейрон является системой, что, в частности, соответствует моделям А.А. Жданова [13]. Теперь можно задать математически строго поставленный вопрос: поскольку каждый нейрон мозга является системой и в мозге осуществлены связи нейронов, моделируемые свертками, то каков системообразующий фактор мозга, как системы, при этом охватывающий также и ментальные потоки по [12]?

Заключение

С помощью формализма сверточных поликатегорий, как показано выше, удастся дать обобщение теории систем с включением и формальным описанием системообразующего фактора по П.К. Анохину. Нейрон является системой в категорном смысле, различные соединения нейронов моделируются свертками поликатегории, а системообразующий фактор преобразует с помощью эндофунктора набор исходных систем, применяет к преобразованным системам соответствующую свертку, превращая их в подсистемы вновь образованной составной системы. В частности, такой системой, уже в строго математическом смысле является мозг млекопитающих и человека.

Выводы

Дано категорное определение системы, далеко обобщающее известное определение систем по М. Месаровичу. Даны определения и основные свойства сверточных поликатегорий, сформулированные в виде теорем, в частности, описывающие новые виды дуальности и принцип двойственности для сверточных поликатегорий, являющийся аналогом принципа двойственности для теории категорий, доказанного Хетчером в [16].

В рамках категорных систем даны описания стратификации, слоев и эшелонов, а также системообразующего фактора П.К. Анохина. В ближайшие планы входит установление математических взаимосвязей систем, функциональных систем и биомашсистем на категорном уровне.

Литература

1. Месарович М., Мако Д., Такаха И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
2. Месарович М., Такаха И. Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978. 311 с.

3. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. В сб. Принципы системной организации функций. М., 1973. С. 5–61.
4. Черноиванов В.И., Гулюкин М.И., Толоконников Г.К. Бионический подход к решению проблемы автономности систем управления животноводческих производств // Вестник ВНИИМЖ. 2015. №3(17). С. 76–91.
5. Черноиванов В.И., Савченкова И.П., Толоконников Г.К. Парадигма биомашсистем // Вестник ВНИИМЖ. 2016. №2(22). С. 56–61.
6. Черноиванов В.И. (ред.). Биомашсистемы. Теория и приложения. Т. 1 / Под ред. акад. В.И. Черноиванова. М.: Росинформагротех, 2016. 230с.
7. Черноиванов В.И. (ред.). Биомашсистемы. Теория и приложения. Т. 2 / Под ред. акад. В.И. Черноиванова. М.: Росинформагротех, 2016. 241с.
8. Карташов Л.П., Соловьев С.А. Повышение надежности системы «человек-машина-животное»/ Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 275 с.
9. Черноиванов В.И. Ресурсосбережение и машины с элементами человеческого интеллекта – ответ на кризисные вызовы современности и будущего // Прикл. матем., квант. теория и программ. 2013. Т. 10. № 3. С. 9–19.
10. Толоконников Г.К. Вычислимые и невычислимые физические теории по Р. Пенроузу. Ч. 3 // Прикл. матем., квант. теория и программ. 2012. Т. 9. № 4. С. 3–294.
11. Судаков К.В. Общая теория функциональных систем. М., 1984. 224 с.
12. Анохин К.В. Когнитом: в поисках общей теории когнитивной науки // Шестая международная конференция по когнитивной науке. Калининград, 2014. С. 26–28.
13. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. М.: Бином, 2012. 359 с.
14. Мендельсон Э. Введение в математическую логику. М., 1984. 320 с.
15. Мальцев А.И. Алгебраические системы. М.: Наука, 1970. 345 с.
16. Hatcher W.S. The logical foundations of mathematics. PERGAMON PRESS. 1982. 320 p.

А.С. БАЗЯН

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва
bazyan@mail.ru

МОДЕЛЬ ХЕББА И СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МОЛЕКУЛЯРНЫХ И КЛЕТОЧНЫХ МЕХАНИЗМАХ ПАМЯТИ¹

Описан алгоритм пластичности глутаматергических синапсов, экспериментальный аналог модели Хебба. Анализируется молекулярно-клеточный алгоритм аллостерической пластичности ГАМК_A рецепторов. Обсуждается гипотеза актуализации нейронных сетей, которая осуществляется на молекулярном уровне с помощью механизмов интернализации и рециклизации специфического кластера ГАМК_A рецептора. Предполагается, что это процесс переноса памяти из стадии хранения в стадию рабочей или оперативной памяти, и наоборот.

Ключевые слова: *процессы пластичности, AMPA, NMDA ГАМК_A рецепторы, реализация поведения, обучение, консолидация, хранение и воспроизведение памяти.*

Введение

Хеббовская модель описывает модификацию эффективности синаптической передачи при процессах обучения [1]. В современных компьютерах используется бинарная модель Хебба (0–1). Необученный синапс обозначается как 0 – молчащий синапс, а обученный синапс обозначается как 1.

Молчащие синапсы были обнаружены в конце прошлого века в гиппокампе новорожденных крыс, например, на второй день после рождения. Молчащие синапсы – это синапсы, которые содержат только NMDA рецептор, с очень малым количеством AMPA рецепторов или совсем без этих рецепторов (см. 2). Например, при нормальном потенциале покоя мембраны эти синапсы не проявляют постсинаптических ответов на синаптическое выделение глутамата. Но стоит деполяризовать мембрану, до ~ -50 мВ, частично снимается Mg^{2+} блок NMDA рецептора, и поступающий внутрь клетки через NMDA рецептор Ca^{2+} начинает накапливать и встраивать AMPA рецептор в мембрану и синапс становится не молчащим. У взрослых жи-

¹ Данная работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 17-29-01005-офи_м.

вотных молчащие синапсы уже не выявляются. У взрослых животных Ca^{2+} , поступающий внутрь клетки через NMDA рецептор, является фактором кластеризации или декластеризации AMPA рецепторов. При кластеризации увеличивается количество AMPA рецепторов на постсинаптической мембране и эффективность глутаматергического (ГЛУергического) синапса увеличивается. При декластеризации количество AMPA рецепторов на постсинаптической мембране уменьшается, что вызывает уменьшение эффективности ГЛУергического синапса [см. 2].

Алгоритм модификации эффективности возбуждающего глутаматергического синапса

ГЛУергические синапсы пирамидных и экстрапирамидных нейронных сетей осуществляют возбуждающую синаптическую передачу. ГЛУергические синапсы коры, стриатума и гиппокампа имеют однотипный постсинаптический состав ионотропных рецепторов: постсинаптические AMPA, каинатные и NMDA ионотропные рецепторы [3]. Постсинаптические AMPA и каинатные рецепторы это Na^+/K^+ каналы, их активация агонистами открывает хемочувствительный канал, Na^+ проходит внутрь клетки, накапливает положительный заряд и вызывает генерацию возбуждающего постсинаптического потенциала (ВПСП). NMDA рецептор является $\text{Na}^+/\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}$ каналом и обладает, кроме того, потенциал зависимым Mg^{2+} блоком. Активация NMDA рецептора агонистами открывает хемочувствительный канал, но Na^+ и Ca^{2+} не проходит внутрь клетки, так как канал закрыт Mg^{2+} и клетка не реагирует на пресинаптическую активацию.

NMDA рецептор срабатывает при одновременной активации обоих процессов, деполяризации мембраны и выделения возбуждающих аминокислот. Деполяризация мембраны, снимает Mg^{2+} блок и позволяет открыть хемочувствительный канал NMDA рецептора агонистом, глутаматом. Из-за этих процессов одиночная ГЛУергическая моносинаптическая ВПСП имеет сложную природу. ВПСП состоит из двух компонентов: раннего AMPA ответа, с относительно короткими задержками, которая блокируется AMPA антагонистом и поздняя компонента, с гораздо более длительной задержкой, которая блокируется NMDA антагонистом. Поздняя NMDA компонента значительно увеличивает длительность ВПСП.

Именно на ГЛУергических синапсах коры, дорзального стриатума и гиппокампа реализуется длительная потенциация (ДП), экспериментальный аналог Хебовского синапса. В настоящее время в нейробиологии общепринятой является гипотеза о том, что длительная модификация эффективности синаптической передачи является одним из механизмов па-

мяти и обучения: ДП и длительная депрессия (ДД) возбуждающих ГЛУ-ергических синапсов гиппокампа, коры и дорзального стритатума интенсивно изучаются [3]. Активация NMDA рецепторов, приводит к увеличению постсинаптической концентрации Ca^{2+} и к изменению количества вторичных посредников: протеинкиназ и протеинфосфатаз, определяющих степень фосфорилирования ионотропных AMPA и NMDA рецепторов, от которой зависит их чувствительность к глутамату. При высоком уровне Ca^{2+} число AMPA рецепторов возрастает, кластеризация AMPA рецептора, и развивается ДП. Средний уровень Ca^{2+} приводит к дефосфорилированию рецепторов, декластеризация AMPA рецептора, и развивается ДД [3]. ДП возникает при сочетанной активации двух ГЛУергических синаптических входов одного нейрона, или при сочетанной активации одного синаптического входа нейрона с поляризацией мембраны нейрона, или при высокочастотной стимуляции одного синаптического входа нейрона. При несочетанной активации двух ГЛУергических синаптических входов одного нейрона возникает ДД, которая выключает несочетанный синаптический вход.

При активации ГЛУергического синапса, постепенно нарастающая деполяризация вызванная AMPA компонентой ВПСП снимает Mg^{2+} блок NMDA рецептора, ГЛУ открывает хемочувствительный канал, Na^+ и Ca^{2+} начинают поступать внутрь клетки, вследствие чего запускается поздняя NMDA компонента. Активация первого синапса, вызывают деполяризацию мембраны нейрона и снимает Mg^{2+} блок NMDA рецептора второго синапса. Активация второго синапса открывает хемочувствительные ворота разблокированного NMDA рецептора. NMDA рецептор активируется одновременно с AMPA рецептором и функционирует с высокой амплитудой. Прошедший внутрь клетки Ca^{2+} высокой концентрации функционирует как вторичный посредник, запускает метаботропные реакции фосфорилирования и дефосфорилирования, которые модулируют реакцию AMPA и NMDA рецептор и вызывают потенциацию AMPA и NMDA ответов. Это первый этап реакции. Вторым этапом процессы фосфорилирования запускают модификацию экспрессию генов, которая консолидирует потенциацию AMPA NMDA ответов и переводит ее в долговременную память, то есть индуцирует ДП, в том числе, и повышением числа AMPA рецепторов встроенных в постсинаптическую мембрану.

При несочетанной активации двух синаптических входов, второй синапс фактически работает без поддержки первого синапса. При этом срабатывает поздняя компонента NMDA рецептора, которая значительно ниже AMPA компоненты. Поздняя компонента NMDA рецептора, пропускает внутрь клетки меньшую концентрацию Ca^{2+} , которая модифици-

рует AMPA и NMDA рецепторы и вызывают депрессию AMPA ответов, через уменьшение количества AMPA рецепторов встроенных в постсинаптическую мембрану. Этот процесс так же вызывает модификацию экспрессии генов и консолидирует депрессию ответа первого этапа, индуцируя ДД. Так как у нейронов очень много синаптических входов, а при обучении сочетаются не все входы, то получается, что при обучении ДП подвергаются входы тех стимулов, которые совпадают друг с другом. А входы несовпадающих стимулов, подвергаясь ДД, не участвуют или слабо участвуют в процессах обучения. Вот этот процесс предсказал Хебб в своей теории синаптической пластичности [1].

Другой моделью ДП или обучения считается высокочастотная длительная посттетаническая потенция (long-term post-tetanic potentiation – LTP). NMDA–рецептор функционирует таким образом, что при моносинаптической реакции активация синапса совпадает или сочетается со следующей активацией того же синапса. Фактически механизм тот же самый, что и при сочетании двух входов или при сочетании одного входа и поляризации нейрона [3]. Так как индуцируемая вошедшим Ca^{2+} модуляторная реакция медленная и длительно удерживаемая, а частота активации синапса высокая, то следующий стимул накладывается, т.е. сочетается с предыдущей модуляторной реакцией, которая в конечном счете приводит к значительному повышению концентрации внутриклеточного Ca^{2+} . Реакция опять же двухэтапная: первый этап реакции, процессы фосфорилирования AMPA и NMDA рецепторов относятся к кратковременной памяти, а процессы модификации экспрессии генов консолидируют реакцию первого этапа и переводят ее в долговременную память.

На уровне целостного организма очень много информации хранится в памяти на очень длительное время и порой на всю жизнь. Поэтому предполагается, что обученные нервные сети так же сохраняются и остаются функционально актуальными на длительное время. Подавляющее большинство всех исследований по ДД и ДП проведены на срезах мозга, одиночных нейронах регистрируемых методом patch-clamp, или ограниченных группах нейронов, регистрируемых другими нейрофизиологическими методами. Но срезы живут не более нескольких часов. В большинстве работ ДП в изолированных срезах удерживается в течение 6 часов. Далее срезы мозга начинают терять свою функциональную активность. Основанием для предположения, что ДП и ДД сохраняется на длительное время, является то обстоятельство, что консолидация этих процессов связана с модификацией экспрессии генов. Во многих работах показано, что если на ранних этапах развития ДП использовать блокаторы синтеза белка, которые препятствуют модификации экспрессии генов, то ДП очень быстро исчезает. Точно так

же, если на уровне целого организма, на ранних этапах обучения использовать блокаторы синтеза белка, препятствующие модификации экспрессии генов, то память не консолидируется, то есть не переходит в долговременную фазу и не воспроизводится в дальнейшем. Причем это единственный известный механизм нарушения консолидации памяти.

Аллостерическая пластичность ГАМК_A рецептора

Предполагается, что на аксонах каждого нейрона локализовано около 30–40 тысяч синапсов. Часть из них возбуждающие – ГЛУергические, другая часть тормозные – ГАМКергические. Ответ нейрона представляет собой алгебраическую сумму процессов возбуждения и торможения. Несмотря на это процессы пластичности исследуются отдельно на ГЛУергических синапсах, это мы описали выше, и на ГАМКергических синапсах, это мы опишем ниже, как аллостерическую пластичность ГАМК_A рецептора [3–7].

ГАМК_A рецептор имеет 5 участков или сайтов связывания: ГАМК сайт, бензодиазепиновый (БДЗ сайт), пикротоксиновый (ПТК сайт), барбитуратный сайт и нейростероидный сайт. После взаимодействия нейроактивных стероидов с ГАМК_A рецептором, запускаются процессы внутриклеточной оксигенации, которые трансформируют некоторые внутриклеточные метаболиты в лиганды стероидных рецепторов. Связывания лигандов с внутриклеточными стероидными рецепторами, индуцирует модификацию экспрессии генов. Эти сайты являются аллостерическими регуляторами друг друга [3, 4]. Два вещества называются аллостерическими регуляторами тогда, когда у каждого из этих веществ свой отдельный сайта связывания. Взаимодействие одного вещества со своим сайтом вызывает конформационные изменения в другом сайте и модифицирует параметры связывания другого вещества с собственным сайтом. Это означает, что активация ГАМК_A рецептора через его любой сайт, аллостерически активирует нейростероидный сайт и запускает трансдукционный сигнал, то есть экспрессию генов. Геном мозга млекопитающих кодирует 19 субъединиц ГАМК_A рецептора: 6 изоформ α субъединицы, 3 изоформы β субъединицы, 3 изоформы γ субъединицы, 3 изоформы ρ субъединицы и по 1 изоформе δ , ϵ , π , θ субъединиц [3, 4]. Нативный ГАМК_A рецептор содержит два α субъединицы, два β субъединицы и одну γ субъединицу. Хлорный канал открывается при взаимодействии двух молекул ГАМА с ГАМК_A сайтом. Субъединичная композиция рецептора определяет степень аллостерической регуляции ГАМК_A рецептора.

Показано, что выработка повышенной судорожной активности (киндлинга) приводит к модификации аллостерической регуляции ГАМК_A рецептора, модификации экспрессии генов судьединиц рецептора [3, 4], и как следствие, предполагается изменение субъединичной композиции рецептора. Целью наших эксперимента было исследование процессов аллостерической регуляции ГАМК_A рецепторов, и их способность к длительным пластическим перестройкам. Введение конвульсивной дозы ПТЗ, тормозит ГАМК_A рецептор, вызывает перевозбуждение за счет процесса алгебраической суммы ГАМК и ГЛУ активности и индуцирует судороги. Ежедневное введение субконвульсивной дозы ПТЗ (20 мг/кг в течение 24 суток), вызывало у крыс повышенную судорожную готовность [5], то есть низкие подпороговые дозы ПТЗ начинали вызывать судороги, как при высоких дозах. При этом константы связывания меченого диазепам уменьшалась на 20 % за счет уменьшения плотности (Bmax) БДЗ сайта ГАМК_A рецепторов, без изменения константы диссоциации (Kd). Эта реакция сохранялась в течение 48 часов и возвращалась к исходному, контрольному уровню на 7 сутки. Второе, через 48 часов после выработки киндлинга, так же наблюдалось уменьшение активности ГАМК сайта ГАМК_A рецептора, что проявлялось как уменьшение мусцимол индуцируемого поглощения ³⁶СГ синаптонейросомами из коры мозга киндлинговых крыс, при тех же условиях эксперимента [6]. Поэтому мы называем эту реакцию аллостерической пластичностью ГАМК_A рецептора. ПТЗ связывается с пикротоксиновым сайтом ГАМК_A рецептора и аллостерически модифицирует на длительное время, на 48 часов, активность БДЗ и ГАМК сайтов ГАМК_A рецептора. Через 7 суток активность рецептора возвращается к исходному уровню, как будто никакой выработки повышенной судорожной готовности не было [5]. Такого типа реакции очень широко наблюдаются при процессах обучения.

Через 6 месяцев, срок равный 1/5 жизни крысы, почти 15–20 лет для человека, мы исследовали воспроизведение судорожной активности и активности ГАМК_A рецептора у контрольных крыс, у киндлинговых крыс после напоминания (ПТЗ 30 мг/кг) и у киндлинговых крыс с выраженной судорожной активностью 6 месяцев назад, но без напоминания [3–5]. Мы воспроизвели параметры выработанной 6 месяцев назад активность ГАМК_A рецептора, которые наблюдали у 4-месячных крыс. А у 10-месячных крыс судорожная активность вызывает абсолютно другие параметры связывания ГАМК_A рецептора. То есть консолидированная реакция воспроизводится независимо, или даже наперекор, текущей активности рецептора.

Анализ полученных результатов, [3–5] позволили сделать вывод о внутринейрональной интеграции активности ГЛУ и ГАМК_A рецепторов, формирования специфических кластеров этих рецепторов и алгебраической суммы ГЛУ и ГАМК_A реакций на новом интегрированном уровне. А также, воспроизведение, при напоминании, этого нового интегрированного уровня реакции на молекулярном уровне. Напомним, что кластеризация или декластеризация ГЛУергического рецептора контролируется концентрацией внутриклеточного Ca²⁺. А кластеризация или декластеризация ГАМК_A рецептора контролируется типом γ субъединицы в составе или субъединичной композиции ГАМК_A рецептора. Это и есть один из параметров молекулярно клеточных механизмов памяти. Но с помощью какого механизма воспроизводятся активность рецептора, с выработанными ранее параметрами. Это процесс связывается с убиквинизацией и интернализацией рецепторов в эндосому, можно полагать, что это механизм хранения памяти. По-видимому, рецептор сохраняет вновь выработанную активность в эндосоме вследствие ассоциации с ГАБ1 белком. И далее рециклируется и встраивается, в законсервированном виде, в субсинаптическую мембрану при напоминании – это механизм воспроизведения памяти [3, 4].

Но могут спросить, как это вы описываете процессы памяти и ее воспроизведения на примере судорожных состояний, в то время как, судорожное состояние вызывает амнезию? Мы специально исследовали этот вопрос на примере условного рефлекса пассивного избегания (УРПИ) [7]. У крыс вырабатывали УРПИ, который хорошо воспроизводился на следующий день. Если сразу после обучения крысам вводить ПТЗ (50 мг/кг) и вызвать судороги, то у крыс возникает амнезия. На следующий день рефлекс не воспроизводится. Но если за 2 часа до воспроизведения, крысам ввести низкую дозу ПТЗ (30 мг/кг), то рефлекс прекрасно воспроизводится. Следовательно, мы имеем дело не с амнезией, а с диссоциированным обучением.

Другое название диссоциированного обучение это, зависимое от обучения состояние. Что же это за состояние, зависимое от обучения? УРПИ основывается на выработке реакции страха перед темным отсеком камеры. Известно, что ПТЗ в субконвульсивных дозах анксиоген и вызывает состояние страха. Следовательно, состояние, зависимое от обучения, в данном случае, это состояние страха (подробнее смотри [2, 6]). Но известны и другие вещества, которые вызывают состояние страха. Например, галоперидол, в субкаталептической дозе вызывает состояние страха. У животных вырабатывали амнезию введением сразу после обучения 50 мг/кг ПТЗ. Если этим крысам, на второй день, за 2 часа до тестирова-

ние вводить субкаталептическую дозу галоперидола (0,25 мг/кг), то рефлекс прекрасно воспроизвелся. Следовательно, воспроизведение данного навыка зависит также, от напоминания состояния страха [7].

Возможные механизмы актуализации и деактуализации нейронной сети и рабочей памяти

Теперь рассмотрим, к каким следствиям приведет описанный нами процесс интернализации специфического кластера ГАМК_A рецептора внутрь клетки, и его рециклизация на субсинаптическую мембрану с помощью напоминания и ГАБ1 белка. Основная медиаторная система в базальных ганглиях (моторный контроль) ГАМКергическая. Базальные ганглии функционируют за счет алгебраической суммы ГАМК и ГЛУергических систем. Что произойдет, если через несколько суток после обучения нормализуется активность ГАМК_A рецепторов в сетях базальных ганглий? Нормализация активности ГАМК_A рецептора в этих сетях приведет к расформированию обученной сети. Но как было показано, при напоминании, вновь выработанная активность ГАМК_A рецептора скачком воспроизводится. Сеть сохраняется, но в интернализированном виде. Можно считать, что это стадия хранения памяти. При напоминании, специфический кластер ГАМК_A рецептора который вырабатывается при обучении, рециклируется и переходит в рабочее состояние. Причем рециклизация ГАМК_A рецептора воспроизводит связанную с ним специфическую активность ГЛУергических рецепторов. Можно полагать, что эта актуализация нейронных сетей, которая осуществляется на молекулярном уровне с помощью механизма рециклизации специфического кластера ГАМК_A рецептора, является процессом переноса памяти из стадии хранения в стадию рабочей или оперативной памяти. Деактуализация нейронных сетей, которая осуществляется на молекулярном уровне с помощью механизма интернализации специфического кластера ГАМК_A рецептора, это процесс переноса памяти из стадии рабочей или оперативной памяти в стадию хранения.

При длительном отсутствии напоминания память стирается постепенной деградацией специфического кластера ГАМК_A рецептора внутри эндосомы. Например, вождение автомобиля, после длительного перерыва приходится специально восстанавливать прежний уровень вождения. Владение иностранным языком, при отсутствии ежедневной тренировки язык забывается. При этом напоминание играет ключевую роль для сохранения памяти. Оно систематически актуализирует рабочую память рециклизацией рецепторов и восстановлением нейронной сети. Этот про-

цесс запускает дальнейшую модификацию экспрессии генов и дальнейшую консолидацию памяти.

Сети, которые используются ежедневно, например вертикальная ходьба, речь, всегда находятся в актуализированном состоянии, вероятнее всего, благодаря тем молекулярно-химические и нейрофизиологические процессам, которые мы описали.

Заключение

Таким образом, теория Хебба оказалась очень хорошей моделью для создания компьютеров и очень много предсказала о процессах пластичности ГЛУергической синаптической передачи. Но кроме ГЛУергических синапсов, в головном мозге млекопитающих имеются и ГАМКергические синапсы, которые обладают аллостерической пластичностью ГАМК_A рецептора. При реализации процессов пластичности, ГАМК и ГЛУ рецепторы взаимодействуют, интегрируются на уровне внутриклеточных реакций, и вырабатывают новый уровень алгебраически суммированного ответа нейрона. Этот новый уровень ответа удерживается в течение нескольких суток, формируя специфическую активность сети, а затем расформировывается, по всей видимости интернализацией молекул рецепторов в эндосому. Напоминание приводит: к скачкообразной рециклизации молекул рецептор и к встраиванию в субсинаптическую мембрану и воспроизведению памяти.

Описанный процесс является глобальным преимуществом живой нервной системы перед компьютером, который очень трудно восполнить. Вторым глобальным преимуществом живой нервной системы перед компьютером, о котором в этой статье ничего не было сказано, является формирование эмоциональных, мотивационных и психических состояний, которые управляют нейронной сетью, и которые сами управляются нейронной сетью [8]. Мне кажется, что состояние сети непреодолимая проблема для компьютеров и роботов, без которых невозможно хотя бы приблизительное сходство с нервной системой.

Список литературы

1. Hebb D.O. The Organization of Behavior. A Neuropsychological Theory. New York: Wiley and Sons. 1949.
2. Citri A., Malenka R.C. Synaptic plasticity: Multiple forms, functions, and mechanisms // *Neuropsychopharmacol.* 2008. V. 33. No 1. P. 18–41.

3 Базян А.С. Молекулярно-нейрохимические и нейрофизиологические механизмы пластичности: реализация поведения, обучение, консолидация, хранение и воспроизведение памяти // Усп. физиол. наук. 2013. Т. 44. № 4. С. 3–23.

4. Базян А.С., Хашаев З.Х. Аллостерическая пластичность ГАМК_A рецептора и внутринейронная интеграция на уровне трансдукционного сигнала // Усп. физиол. наук. 2010. Т. 41. № 1. С. 3–25.

5. Bazyan A.S., Zhulin V.V., Karpova M.N., Klishina N.Y. and Glebov R.N. Long-term reduction of benzodiazepine receptor density in the rat cerebellum by acute seizures and kindling and its recovery six months later by a pentylenetetrazole challenge // Brain Res. 2001. V. 888. No 2. P. 212–220.

6. Ребров И.Г., Карпова М.Н., Андреев А.А., Клишина Н.Ю., Кузнецова Л.В., Ван Луийтелаар Ж., Базян А.С. Хлорная проводимость ГАМК_A рецептора синаптонейросом из коры мозга крыс WAG/Rij, с абсанс эпилепсией, и крыс Вистар в раннем периоде развития киндинга и после его окончания // Нейрохимия. 2007. Т. 24. № 4. С. 318–323.

7. Базян А.С., Гецова В.М., Орлова Н.В. Фармакологическое напоминание эмоционального состояния облегчает воспроизведение амнезирванного следа памяти // Рос. Физиол. Журн. им. И.М. Сеченова. 2000. Т. 86. № 5. С. 578–587.

8. Базян А.С. Молекулярные, клеточные и системные механизмы мотивационных и эмоциональных состояний, реализация целенаправленного поведения и эмоционально насыщенная когнитивная карта мозга // XVIII Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика – 16»: Лекции по нейроинформатике. М: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 147–170.

О.Е. ДИК

Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург
dickviola@gmail.com

О ВОЗМОЖНОСТИ МОДУЛЯЦИИ НОЦИЦЕПТИВНЫХ СИГНАЛОВ

С помощью метода бифуркационного анализа модели ноцицептивного нейрона рассматривается возможность регуляции ноцицептивного сигнала в дорсальных ганглиях крысы. Обнаружено, что в модели могут возникать два типа эктопической пачечной активности, а ее подавление связано с изменением параметров $Na_v1.8$ натриевых каналов, определяющем, в свою очередь, действие на эти каналы 5-гидрокси- γ -пирон-2-карбоновой (коленовой) кислоты.

Ключевые слова: *ноцицепция, бифуркационный анализ, пачечные разряды.*

Введение

Известно, что в ответ на повреждающее воздействие, ноцицептивные нейроны могут генерировать необычные эктопические пачечные разряды [1]. Пачечная активность играет важную роль в передаче физиологических сигналов, поэтому неудивительно, что она с большой степенью вероятности должна присутствовать в восприятии болевого сигнала. Нормально низкий уровень электрической активности в нейронах дорсальных ганглиев, отмечаемый, как правило, в 75 % нейронов в виде медленных нерегулярных одиночных разрядов, многократно усиливается, когда эти разряды трансформируются в пачечную активность с высокой частотой импульсов внутри пачки [2]. Это резко усиливает вероятность возникновения эктопического пачечного разряда, связанного с передачей болевого сигнала [3].

Молекулярные механизмы возникновения пачечной активности различны в разных клетках, однако быстрая импульсная активность модулируется медленной отрицательной обратной связью, потенциалозависимой или Ca^{2+} -зависимой [4]. Считается, что для нейронов дорсальных ганглиев после повреждающего воздействия характерен потенциалозависимый механизм возникновения пачечной активности [1]. Однако, однозначный ответ на вопрос о том, какие именно ионные каналы входящих токов вносят основной вклад в возникновение пачечной активности при повреждающем болевом воздействии, до сих пор не получен. Множество медиаторов, присутствующих в поврежденных нервах, способно различным образом изменять кинетику входящих токов, и неизвестно отражается ли повреждение в сдвиге относительных популяций типов специфических натриевых каналов или только в изменении кинетики отдельных каналов [5].

В связи с этим изучение механизмов подавления эктопической пачечной активности, возникающей в ноцицептивных нейронах после повреждающего воздействия весьма актуально. Ключевая роль в генерации болевой чувствительности принадлежит медленным тетродотоксинустойчивым натриевым каналам $Na_v1.8$, поскольку повышение синтеза этих каналов связано с гипервозбудимостью ноцицептивных нейронов вследствие изменений в структурах, связанных с проведением ноцицептивных сигналов и возникновением нейропатической боли [6].

Цель работы – выяснить взаимоотношения между изменениями в значениях параметров модели и типом ее решения при модификации медленных натриевых каналов $Na_v1.8$, связанной с действием на них лекарственной субстанции анальгетика.

Модель

Известно, что основной вклад в генерацию импульсной активности, возникающей в ноцицептивных нейронах дорсальных ганглиев млекопитающих, вносят натриевые токи, задержанный калиевый (I_K) токи и ток утечки (I_L) [7]. Среди множества натриевых токов выделяют быстро активирующийся и быстро инактивирующийся тетродотоксичувствительный натриевый (I_{Na_f}), промежуточный, быстро активирующийся и медленнее инактивирующийся натриевый (I_{Na_l}), и медленный (еще медленнее инактивирующийся) тетродотоксин-устойчивый натриевый (I_{Na_s}), генерируемые Nav1.1, Nav1.7 и Nav1.8 каналами, соответственно. На основании этих фактов модель мембраны ноцицептивного нейрона может быть описана следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= (I - I_{Na_f}(m, h, E) - I_{Na_l}(b, E) - I_K(n, E) - I_L(E) - I_{Na_s}(s, r, E)) / c_m, \\ \frac{dx}{dt} &= (x_\infty(E) - x) / \tau_x(E), \quad x = m, h, n, b, s, r \end{aligned} \quad (1)$$

где E – величина мембранного потенциала; I – величина стимулирующего тока.

Ионные токи определяются выражениями:

$$I_{Na_f} = g_{Na} m^3 h (E - E_{Na}), \quad I_{Na_l}(b, E) = g_{Na_l} m_{\infty} (E) b (E - E_{Na}),$$

$$I_K(n, E) = g_K n (E - E_K), \quad I_L(E) = g_L (E - E_L), \quad I_{Na_s}(s, r, E) = g_{Na_s} s^3 r (E - E_{Na}),$$

где переменные m , h , n , b , s , r описывают воротные характеристики процессов активации и инактивации ионных каналов, константы $c_m = 1 \mu\text{Ф}/\text{см}^2$; $g_{Na_l} = 27 \text{ мС}/\text{см}^2$, $g_K = 1,5 \text{ мС}/\text{см}^2$, $g_L = 1,4 \text{ мС}/\text{см}^2$, $g_{Na_s} = 5 \text{ мС}/\text{см}^2$ определяют емкость мембраны, максимальные проводимости промежуточного (задержанного) натриевого, задержанного калиевого и каналов утечки, а $E_{Na} = 62 \text{ мВ}$, $E_K = -94 \text{ мВ}$, $E_L = -77 \text{ мВ}$ – равновесные потенциалы для Na^+ , K^+ ионов и ионов утечки.

Потенциал-зависимые стационарные и динамические характеристики воротных процессов всех каналов, кроме каналов Nav1.8, определялись функциями, детально описанными в работе [7].

Активация и инактивация медленных тетродотоксин-устойчивых натриевых каналов Nav1.8 описывались функциями, определенными ранее по экспериментально зарегистрированным медленным натриевым токам [2]:

$$\tau_s(E) = 1/(e^{a_1 E + b_1} + e^{a_2 E + b_2}), \quad s_\infty(E) = e^{a_1 E + b_1} / (e^{a_1 E + b_1} + e^{a_2 E + b_2}),$$

$$\tau_r(E) = 1/(e^{a_3 E + b_3} + e^{a_4 E + b_4}), \quad r_\infty(E) = e^{a_3 E + b_3} / (e^{a_3 E + b_3} + e^{a_4 E + b_4}),$$

где

$$a_1 = 0,043 \pm 0,002, b_1 = -2,22 \pm 0,11, a_2 = -0,048 \pm 0,003, b_2 = -4,33 \pm 0,23,$$

$$a_3 = -0,032 \pm 0,002, b_3 = -6,41 \pm 0,41, a_4 = 0,056 \pm 0,005, b_4 = -5,62 \pm 0,31.$$

На основании полученных зависимостей величина эффективного заряда (Z_{eff}) связанного с конформационным изменением активационной воротной системы при переносе иона через мембрану (в единицах заряда электрона). может быть определена как $Z_{eff} = (3kT/e)(a_1 - a_2)$, где \bar{e} – абсолютная величина заряда электрона, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, коэффициент 3 учитывает трехбарьерность модели (s^3) с одним открытым и тремя закрытыми состояниями. Рассчитанная величина эффективного заряда составляет $Z_{eff} = 6,9 \pm 0,3$ [8].

Изменения в зависимостях активационной воротной структуры после воздействия на мембрану нейрона 5-гидрокси- γ -пирон-2-карбоновой (комоновой) кислоты, являющейся лекарственной субстанцией анальгетика аноцептина, в концентрации 100 нМ/л [1] соответствуют уменьшению эффективного заряда до величины $Z_{eff} = 4,7 \pm 0,2$ и изменению характеристик активационной воротной системы до значений $a_1 = 0,047 \pm 0,003$, $b_1 = -2,71 \pm 0,16$, $a_2 = -0,015 \pm 0,002$, $b_2 = -4,05 \pm 0,27$ [8].

Разделение пространства параметров модели на области качественно различных решений

Для установления связей между значениями параметров модели, описывающей импульсную активность, и типом решения исследуемой модели до и после ее анальгетической модуляции необходимо найти границу, разделяющую множество значений параметров на области качественно различных типов устойчивых решений (при которых наблюдается периодическая импульсация, и при которых колебания отсутствуют или являются затухающими). Для построения этой границы, применялся метод бифуркационного анализа [9] и пакет программ MATCONT [10]. Численные решения системы (1) внутри полученной области устойчивых периодических решений находились методом Рунге-Кутты четвертого порядка, модифицированным алгоритмом Гира с выбором переменного шага интегрирования.

Так как в режиме пачечной активности переходы между активной фазой, в которой наблюдаются пачечные разряды и фазой их отсутствия,

связаны с взаимодействием быстрых и медленных колебаний мембранного потенциала, то для нахождения границы области пачечной активности было применено разложение исходной системы на медленную и быструю. В рамках такого подхода возникновение быстрой компоненты пачечного разряда рассматривается как результат бифуркации быстрой подсистемы при изменении значений медленных переменных, которые выполняют роль бифуркационных параметров [11]. В связи с тем, что калиевый и медленный натриевый токи имеют постоянные времена (τ_n и τ_r), значительно превышающие эти величины для других токов, в качестве быстрой подсистемы будем рассматривать систему

$$\frac{dE}{dt} = (I - I_{Naf}(m, h, E) - I_{Nal}(b, E) - I_K(n, E) - I_L(E) - I_{Nas}(s, r, E)) / c_m,$$

$$\frac{dx}{dt} = (x_\infty(E) - x) / \tau_x(E), \quad x = m, h, b, s,$$

в которой n и r являются медленно меняющимися бифуркационными параметрами.

Медленную систему запишем в виде

$$I - I_{Naf}(m, h, E) - I_{Nal}(b, E) - I_K(n, E) - I_L(E) - I_{Nas}(s, r, E) = 0,$$

$$\frac{dx}{dt} = (x_\infty(E) - x) / \tau_x(E), \quad x = n, r$$

Начало активной фазы пачечного разряда соответствует потере устойчивости стационарного состояния быстрой подсистемы, а окончание активной фазы соответствует потере устойчивости предельного цикла быстрой подсистемы [12].

Результаты

На рис. 1 на плоскости (I, g_{Na}) представлены двухпараметрические бифуркационные диаграммы полной системы до и после модификации натриевых $Na_v1.8$ каналов. Сплошные линии являются кривыми бифуркации Андронова-Хопфа и определяют границы, разделяющие плоскость параметров (I, g_{Na}) на области устойчивых и неустойчивых стационарных состояний полной системы, и ограничивают области повторных ответов.

Штрих-пунктирными линиями обозначены границы областей, внутри которых существуют пачечные разряды. При этом область пачечной активности внутри левой области стационарных состояний полной системы ограничена кривой бифуркации Андронова-Хопфа быстрой подсистемы и кривыми седло-узловых бифуркаций предельного цикла, начинающимися в точке обобщенной бифуркации Хопфа. Область пачечной активности

внутри правой области стационарных состояний полной системы ограничена кривой седло-узловой бифуркации предельного цикла и кривой бифуркации седло-узел на инвариантном круге. Отметим, что при значениях параметров модели, соответствующих контрольным условиям ($Z_{eff} = 6,9 \pm 0,3$) (рис. 1, а) существуют две области ритмической активности и разряды наблюдаются при значениях тока $10 < I < 80$ ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Наличие двух областей ритмической активности объясняется наличием четырех вместо двух точек бифуркации Андронова-Хопфа для каждого значения параметра g_{Na} . Пачечная активность наблюдается при значениях стимулирующего тока от $I = 16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ до $I = 27 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ и от $I = 33 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ до $I = 57 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

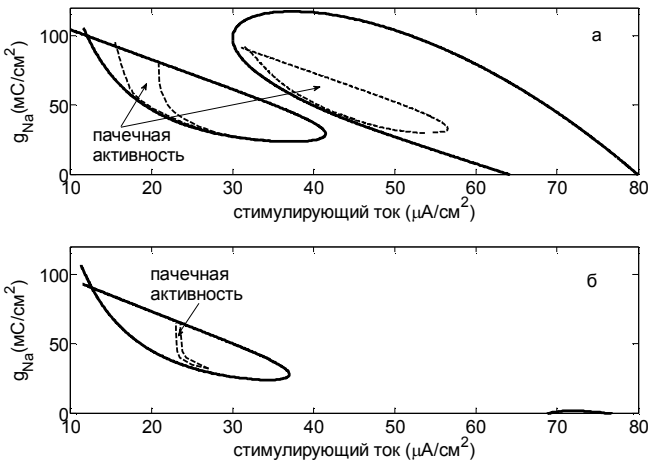


Рис. 1. Сравнение областей пачечной активности на плоскости (g_{Na}, I) до и после модификации ТТХ –устойчивых натриевых $Na_v1.8$ каналов (рис. 1, а и 1, б, соответственно)

После модификации параметров активационной воротной системы медленных тетродотоксин-устойчивых натриевых каналов $Na_v1.8$, вызванной действием 5-гидрокси- γ -пирон-2-карбоновой (комоновой) кислоты, приводящей к уменьшению величины эффективного заряда до значения $Z_{eff} = 4,7 \pm 0,2$, в физиологически значимых пределах параметров g_{Na} и I остается только одна область ритмической активности на плоскости параметров (I, g_{Na}) , так как для второй области значения g_{Na} становятся отрицательными (см. рис. 1,б). Таким образом, правая область

для модифицированной системы практически исчезает, то есть после модификации $N_{a1.8}$ каналов коеновой кислотой при больших значениях стимулирующего тока импульсная активность подавляется, а диапазон значений параметров, при которых в модели возможны пачечные разряды, существенно уменьшается.

Рассмотрим механизмы возникновения пачечной активности в модели нейрона дорсального ганглия. На однопараметрической бифуркационной диаграмме, построенной при значениях параметров $g_{Na} = 39,71$ мС/см², $I = 22,4$ мА/см² и представленной на рис. 2б, величина r является бифуркационным параметром. Бифуркационная диаграмма включает в себя ветви стационарных состояний и периодических орбит. Сплошные/штрихпунктирные кривые определяют устойчивые/неустойчивые стационарные состояния. Неустойчивые периодические орбиты обозначены незаштрихованными кружками, устойчивые орбиты - заштрихованными, отражающими максимальные и минимальные значения потенциала E орбиты. В интервале между пачками траектория полной системы (сплошная кривая) движется в сторону уменьшения параметра r вдоль ветви стационарных состояний быстрой подсистемы. Активная фаза пачечной активности начинается, когда траектория проходит через точку (subH) субкритической бифуркации Андронова-Хопфа быстрой подсистемы. В этой точке стационарное состояние полной системы теряет устойчивость, и система скачком переходит в режим колебаний с нарастающей амплитудой до тех пор, пока траектория системы не достигнет ветви устойчивых периодических колебаний большой амплитуды. Затем траектория движется влево, пока не достигнет седло-узловой бифуркации предельного цикла (обозначенной как LPC точка) (fold limit cycle bifurcation). Наконец, траектория полной системы возвращается к E -нульклине ($dE/dt = 0$) и затухающим колебаниям. Это тип пачки Хопф/складка (subHopf /fold cycle burster) по топологической классификации моделей пачечной активности Ижикевича [13], так как активная фаза пачечной активности начинается в точке субкритической бифуркации Андронова-Хопфа и заканчивается в седло-узловой бифуркации предельного цикла быстрой подсистемы. Именно такой тип пачечной активности развивается в поврежденных сенсорных нейронах после травмы и инициируется, вероятно, подпороговыми колебаниями мембранного потенциала вокруг деполаризованного состояния [14].

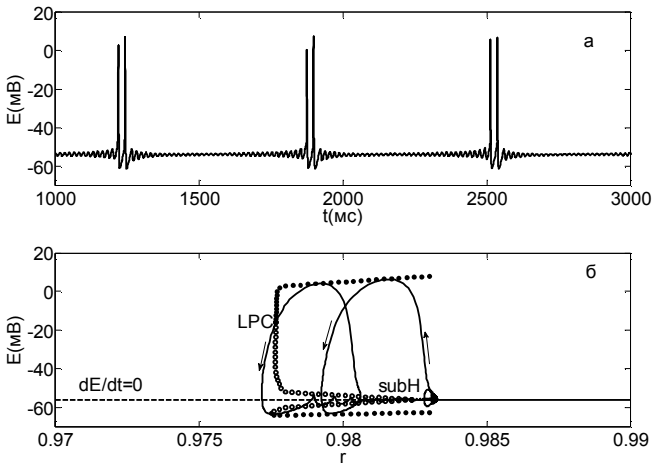


Рис. 2. Пример пачечных разрядов типа пачки Хопф/складка (subHopf /fold cycle burster) модели ноцицептивного нейрона при значениях параметров $g_{Na} = 39,71$ мС/см², $I = 22,4$ мА/см².

Траектория полной системы (сплошная кривая) расположена в проекции на плоскость (r, E) , вдоль бифуркационной диаграммы быстрой подсистемы

Другой возможный механизм возникновения пачечных разрядов в модели нейрона дорсальных ганглиев показан на рис. 3 для значений параметров $g_{Na} = 63,59$ мС/см², $I = 44,3$ мА/см². Активная фаза пачечной активности в этом случае начинается, когда траектория полной системы (сплошная линия) проходит через точку бифуркации седло-узел на инвариантном круге (saddle-node bifurcation on invariant circle) быстрой подсистемы (точка, обозначенная SNIC, которая находится вблизи точки субкритической бифуркации Андронова-Хопфа (точка subH)). Такая бифуркация приводит к появлению устойчивого предельного цикла большой амплитуды. В результате в полной системе устанавливается режим колебаний с возрастающей частотой, и траектория полной системы сдвигается вправо до тех пор, пока не достигнет седло-узловой бифуркации предельного цикла (LPC точки). После этого траектория полной системы касается E -нульклина ($dE/dt=0$) в точке гомоклинической бифуркации седла (HM), что приводит к рождению другого предельного цикла с очень большим периодом. Затем траектория полной системы снова достигает точки бифуркации седло-узел на инвариантном круге (SNIC), и пачечная активность возобновляется. Это вариант пачки типа круг/складка через

гомоклиническую петлю гистерезиса circle/fold cycle via homoclinic/circle hysteresis loop (cycle-cycle burster) по классификации Ижикевича [13].

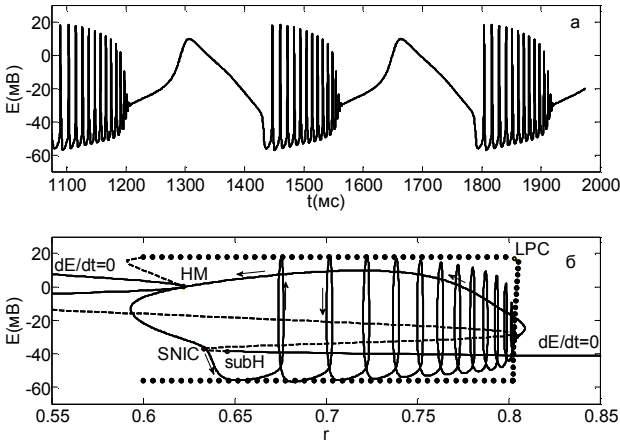


Рис. 3. Пример пачечной активности типа круг/складка через гомоклиническую петлю гистерезиса (circle/fold cycle via homoclinic/circle hysteresis loop (cycle-cycle burster)) модели ноцицептивного нейрона при значениях параметров $g_{Na} = 63,59 \text{ мС/см}^2$, $I = 44,3 \text{ мА/см}^2$

Рис. 4. показывает влияние величины плотности медленных натриевых каналов g_{NaS} на динамику модели. При уменьшении этой величины от 5 до 4 мС/см^2 правая область ритмических разрядов существенно уменьшается. Соответственно уменьшается область пачечных разрядов типа, представленного на рис. 3, а. При $g_{NaS} < 3,5 \text{ мС/см}^2$ такие разряды не наблюдаются. Левая область ритмических разрядов, изображенная на рис 4, слабо изменяется при уменьшении величины g_{NaS} , и пачечные разряды в форме дуплетов сохраняются даже при $g_{NaS} < 3,5 \text{ мС/см}^2$.

Выводы

Рассмотрены два типа пачечных разрядов модели ноцицептивного нейрона дорсальных ганглиях крыс и возможность их регуляции с помощью изменения активационных характеристик $Na_V1.8$ натриевых каналов. Эти изменения, в свою очередь, определяются действием на мембрану нейрона 5-гидрокси- γ -пирон-2-карбоновой кислоты. Таким образом, с

помощью анализа модели показана возможность анальгетической модуляции и даже подавления эктопической пачечной активности, возникающей в ноцицептивных нейронах в ответ на болевое воздействие.

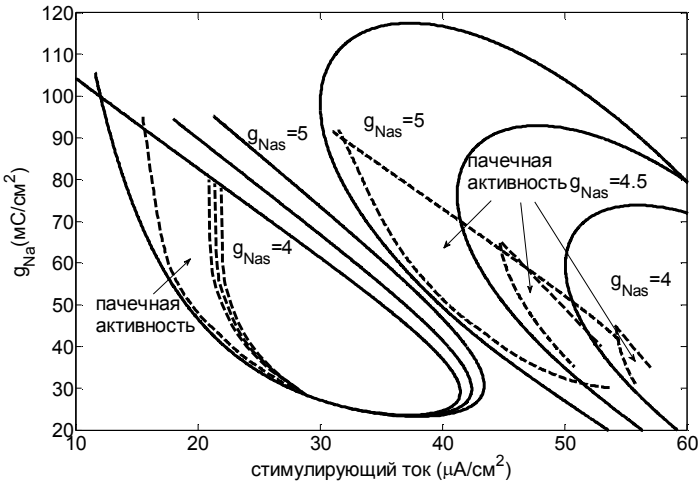


Рис. 4. Области ритмической и пачечной активности модели на плоскости (g_{Na}, I) при различных значениях параметра g_{Na5}

Список литературы

1. Devor M. Ectopic discharge in A-beta afferents as a source of neuropathic pain // *Exp Brain Res*. 2009. V.196: P. 115–128.
2. Michaelis M., Liu X.-G., Janig W. Axotomized and intact muscle afferents but no skin afferents develop ongoing discharges of dorsal root ganglion origin after peripheral nerve lesion // *J Neurosci*. 2000. V.20: P. 2742–2748.
3. Amir R., Michaelis M., Devor M. Burst discharge in primary sensory neurons: triggered by subthreshold oscillations, maintained by depolarizing afterpotentials // *J Neuroscience*. 2002. V. 22: P. 1187–1198.
4. Izhikevich E.M. *Dynamical systems in neuroscience: the geometry of excitability and bursting*. Springer-Verlag. 2004.
5. Bevan S., Storey N. Modulation of sodium channels in primary afferent neurons // *Novartis Found Symp*. 2002. V. 241: P. 144–153.
6. Lai J., Porreca F., Hunter J.C., et al. Voltage-gated sodium channels and hyperalgesia // *Ann Rev Pharmacol Toxicol*. 2004. V. 44: P. 371–397.
7. Kovalsky Y., Amir R., Devor M. Simulation in sensory neurons reveals a key role for delayed Na current in subthreshold oscillations and ectopic discharge: implications for neuropathic pain // *J Neurophysiol*. 2009. V. 102: P. 1430–1442.

8. Dick O.E., Shelykh T.N., Plakhova V.B., et al. Comenic acid decreases the impulse frequency of the nociceptive neuron membrane // *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2015. V. 462: P. 155–157.

9. Kuznetsov Y.A. *Elements of Applied Bifurcation Theory*. Springer-Verlag. New York. 1995.

10. Dhooge A., Govaerts W., Kuznetsov Y.A., et al *MatCont and CL_Matcont Continuation toolboxes in MATLAB*, Utrecht Univ. Netherlands. 2006.

11. Guckenheimer J., Harris-Warrick R.M., Peck., et al. Bifurcation, bursting and spike frequency adaptation // *J Comp Neurosci*. 1997. V. 4: P. 257–277.

12. Guckenheimer J. and Holmes D. *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*. Springer-Verlag. New York. 1983.

13. Izhikevich E.M. Neural excitability, spiking and bursting // *J Bifur and Chaos*. 2000. V.10: P. 1171–1266.

14. Kovalsky Y., Amir R., Devor M. Subthreshold oscillations facilitate neuropathic spike discharge by overcoming membrane accommodation // *Exp Neurol*. 2008. V. 210: P. 194–206.

**А.С. РАТУШНЯК, Т.А. ЗАПАРА,
А.Л. ПРОСКУРА, Е.Д. СОРОКОУМОВ**

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск
Ratushniak.Alex@gmail.com

**О ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕЙРОНОВ
КАК СИСТЕМЫ МНОГОУРОВНЕВЫХ, АВТОНОМНЫХ,
АССОЦИАТИВНО ОБУЧАЮЩИХСЯ,
ПРОГНОСТИЧЕСКИХ, СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫХ
АГЕНТОВ***

На основе теоретико-экспериментального анализа сформированы предположения и подходы к моделированию биологических информационных систем. Такие системы можно конструировать из моделей простых базовых негэнтропийных элементов. Многоуровневые конструкции из таких автономных, ассоциативно обучающихся, прогностических агентов могут создаваться на базе знаний о молекулярной организации нервных клеток и об эволюции биологических систем.

* В работе использованы материалы, полученные при выполнении базового проекта фундаментальных исследований РАН IV.35.1.5, грантов РФФИ № 15-29-04875-офи м и № 17-04-01440-а.

Ключевые слова: молекулярные информационные системы, нейроны, прогностика, негэнтропия, обучение, память.

Введение

Моделирование многоуровневых биологических информационных систем (БИС), как правило, ориентировано на анализ их работы на верхних уровнях организации: целого организма, органов, тканей, реже на клеточном и молекулярном. Такая методология исследований приводит к попытке решения задач уровня сложности, которых далеко выходит за пределы существующих возможностей теоретического и экспериментального анализа. Ориентировочные определения количества информации содержащейся даже в достаточно простых органических молекулах составляет порядка 10^{11} – 10^{12} бит, в сложных (например, ДНК) 10^{14} – 10^{16} бит и более. Скорость обработки информации в организме человека, например, оценивается в 10^{22} бит/с. Современные вычислительные системы способны обработать информацию 10^{10} – 10^{15} бит/с. Общая сумма информации, собранной во всех библиотеках мира, оценивается в 10^{18} бит [1–4]. Такие оценки, пусть даже сугубо ориентировочные, делают понятным, что предпринимаемые попытки разобраться в принципах работы БИС на верхних уровнях их организации достаточно малоперспективны. Поэтому для анализа устройства и моделирования биологических систем, прежде всего, необходимо выбрать тот минимальный объект, моделирование которого возможно и при этом обладающего набором базовых свойств.

В большинстве работ предполагается, что таким объектом – элементарной системой – является клетка – например, один нейрон в мозге [1, 5–7. и др.]. Однако современные знания о молекулярной организации клеток не позволяют представить эту систему как элементарную и доступную для имитационного моделирования. В связи с этим представляется необходимым найти простейшие молекулярные устройства, выполняющие функции, близкие к тем, которые свойственны живым системам. При этом важно определить набор таких функций. В этом качестве в биологии принято считать: 1. Способность к обмену веществ, 2. Способность к размножению, 3. Способность к движению, 4. Способность к раздражимости, 5. Наследственность, 6. Изменчивость. Однако попытка представить возникновение систем сразу со столь обширными функциями естественным эволюционным путем не кажется возможной.

Поэтому необходим анализ базовых физических принципов, лежащих в основе функционирования живых систем и соответствующих им наиболее простых функциональных молекулярных структур. Необходимо учи-

тывать, что «поведение» биологических макромолекул подчинено закономерностям молекулярной логики и информатики [3].

Физические принципы функционирования биологических систем

Для выработки методологии, которая позволит создавать реальные биологически инспирированные имитационные модели биологических систем необходимо сформулировать основные физические принципы их функционирования. Главной особенностью, следствием которой являются все известные функции биологических систем, является их термодинамическая и информационная открытость. Это позволяет таким системам в соответствии с негэнтропийным принципом повышать внутреннюю упорядоченность с использованием получаемой из внешней среды информации, энергии [8–15]. Этот принцип, связывает энтропийные и информационные процессы.

$$S = k \ln W,$$

где S – мера упорядоченности системы; W – термодинамическая вероятность; k – постоянная Больцмана. $N = -S$,

$$N \leftrightarrow I,$$

где N – негэнтропия, I – информация.

Таким образом, парадигма работы биологических информационных систем сводится к негэнтропийному принципу. Информация может вносить отрицательный вклад в энтропию. На этом физическом принципе основано существование биологических систем как зоны устойчивости структурно-функциональных молекулярных ансамблей. Такие ансамбли, используя накопленную информацию, способны прогнозировать будущее состояние внешней и внутренней среды. Включение на основе такого прогноза того или другого алгоритма реакции позволяет этим системам увеличить вероятность избегания неблагоприятных (повышающих энтропию системы) воздействий окружающей среды.

Внешнее воздействие на такую систему приводит к уменьшению этой упорядоченности, и суммарная негэнтропия становилась равна:

$$\Sigma N = N - \Delta N + I.$$

Если это воздействие привело к образованию (химической, пространственной) связи между молекулами, воспринявшими воздействие, – «рецепторами» – и выполнившими некоторое действие – «эффektорами» – по сути ассоциативной, то изменение одной из молекул становилось сигнальным, т.е. несущим информацию I . Эта приобретенная информация в дальнейшем позволяет молекулярной системе включать

эффекторы при более низком, опережающем основное воздействие сигнале. Т.е. уменьшать энтропию с некоторым коэффициентом K_i , создавая дополнительный запас негэнтропии («прибавочная стоимость»):

$$I \rightarrow N \cdot K_i.$$

Таким образом, формируется ассоциативная связь событий. Запоминание (образованием межмолекулярных связей или конформации молекул) факторов – сигналов опережающих основное воздействие. При этом воздействия среды будут селективно выбирать те молекулярные системы, в которых алгоритмы ответа на воздействие позволят избежать или минимизировать неблагоприятные последствия, т.е. уменьшение негэнтропии.

Возникновение биологических систем и их совершенствование отбором на основе обратных связей

Не трудно представить спонтанное возникновение молекулярной системы, состоящей из небольшого числа молекул и обладающей некоторым запасом негэнтропии – негэнтропийных автономных агентов. Такие агенты – «микробиоты» – либо избегали потери упорядоченности (с затратой энергии), либо приобретали дополнительную энергию (например, поглощением энергоемких продуктов или слиянии с себе подобными). То есть подобная молекулярная система обладала некоторым запасом устойчивости. Возникновение в рамках такой простой системы по сути прогностической функции позволило приобрести ей дополнительную устойчивость. Т.е. такие межмолекулярные связи приводили к сохранению N или ее увеличению. Эти системы по степени устойчивости фильтровались обратными связями со средой «естественным отбором». Вероятно, устанавливался баланс между затратами на приобретение информации и негэнтропией системы. При этом молекулярные комплексы с положительным балансом накапливались и постепенно совершенствовались. Вероятно, на основе примерно такого принципа возникли первичные молекулярные системы, послужившие основой эволюционного процесса. Их объединения при взаимопоглощении и дроблении увеличивали количество рецептируемых внешних воздействий, т.е. количество воспринимаемой информации. Это вело к возникновению новых комбинаций свойств таких супрамолекулярных ансамблей со все большей устойчивостью. Возникли системы с более эффективными и развитыми рецепторными и эффекторными молекулярными структурами. Они приобретали преимущество, и на этой основе уже в этих прото клетках формировались подпрограммы, которые потом, вероятно, стали базой основных мотиваций. Вероятно, кроме непосредственных реакций на

внешние воздействия появлялись свойства собственных активных воздействий на окружающую среду. Т.е, таким образом, могли формироваться зачатки познавательных мотиваций. Интеграция первичных негэнтропийных молекулярных ансамблей могла привести к формированию внутренней иерархической структуры состоящей из таких автономных агентов. При этом внешние рецепторы детектировали динамику состояния окружающей среды, а внутренние осуществляли контроль и регулирование процессов происходящих внутри таких микробиот. Т.е. постепенно могли возникать и селективроваться другие функциональные системы. На следующих этапах, вероятно, возникли системы копирования структур приведшие к формированию системы долговременной молекулярной памяти. Простое дробление заменялось размножением с использованием матрицы внутренней долговременной памяти на базе нуклеотидных цепочек. Формировался и совершенствовался генетический аппарат.

Эти системы последовательно увеличили устойчивость БИС за счет перехода от простого дробления к воспроизведению структур ранее селектированных средой. В конечном итоге это привело к возникновению одноклеточных организмов со всеми их мотивационными и структурно функциональными особенностями.

Молекулярные микробиоты, возникшие, по существующим представлениям, почти 4 млрд лет назад, 3,5 млрд лет (до кембрийского периода) совершенствовались и усложнялись. Только около 500 млн лет назад произошло формирование многоклеточных организмов, объединение клеток в сообщества [1, 14, 15 и др.]. Это позволяло таким клеточным системам резко увеличить количество рецептируемых сигналов, обрабатывающих информацию структур и, например, системы передвижения. Увеличилась точность и глубина прогностики. В силу этого такие системы приобрели значительное увеличение устойчивости во внешней среде (жизнестойкости). Стали более успешными в поисках пищи и избегании опасностей. В процессе эволюции многоклеточных организмов усложнялись и совершенствовались организация как самих организмов, так и, прежде всего, именно внутриклеточных молекулярных структурно-функциональные системы (например [15]). В особенности это проявилось у нервных клеток – специализированных на прогностике и при организации их в более сложные сообщества, нейронные сети и мозг.

Такие же предпосылки, вероятно, лежат и в области формирования надорганизменных социальных систем.

Однако на всех уровнях и этапах формирования биологических систем в основе их существования лежит негэнтропийный принцип, а в их

составе присутствуют негэнтропийные автономные супрамолекулярные конструкции.

Подходы к анализу и remodelированию биологических информационных систем

Представляется, что реальный анализ физических свойств живых информационных систем, создание их моделей, необходимо начинать, ориентируясь на простые молекулярные конструкции, осуществляющие информационные процессы. Базовым процессом, лежащим в основе функции всех живых систем, является понижение энтропии на основе прогностики. В качестве конструкций, выполняющих такие функции, можно рассматривать многие внутриклеточные молекулярные комплексы нейронов, например, специализированные рецептор-эффекторные системы синапсов [17, 18 и др.]. Появились данные и предположения о подобных функциях, заложенных в рибосомальном аппарате [18, 19].

Взаимодействия («симбиоз») в нейроне множества подобных молекулярных систем (с размерностью, вероятно, значительно превосходящей сейчас предполагаемую), каждая из которых работает по принципам, заложенным миллиарды лет назад, приводит к возникновению новых интегративных качеств, не свойственных отдельным компонентам, так называемых эмерджентных – системных качеств и функций.

При создании имитационной модели базового элемента живых систем необходимо заложить в ее основу такие основные свойства как сохранение своего состояния на основе прогностики. При этом прогноз может строиться на базе ассоциативного обучения при реактивном или активном взаимодействии такого элемента со средой, т.е. при действии обратных связей. Для последующего конструирования из таких базовых элементов моделей систем более высокого уровня можно использовать знания о конструкции внутриклеточных сигнальных систем. При этом в качестве прототипа таких моделей можно использовать знания о принципах устройства молекулярных машин в клетках специализированных на прогнозировании и управлении – нейронах [17–21].

Однако несомненно, что высказываемые предположения требуют дальнейшего теоретико-экспериментального анализа. Проследить возникновение и становление протобионтов и одноклеточных организмов, вероятно, не представляется возможным. Однако учитывая структурно-функциональную преемственность можно попытаться определить подобные молекулярные комплексы в составе ныне существующих биологических информационных систем, в частности на клеточном

уровне. Наиболее перспективным представляется анализ подобных молекулярных функциональных систем в структуре нейронов – клеток специализированных на функции обработки информации, прогностики и управления. Ранее выполненные нами работы в значительной степени подтверждают целесообразность такого подхода [17, 22]. Вторым перспективным вариантом таких исследований представляется имитационное моделирование процесса развития простых и потому доступных для моделирования функциональных систем [23, 24]. В основу таких моделей могут быть положены физические представления о негэнтропийных, прогностических функциональных комплексах биологических систем. В дальнейшем моделирование объединения таких комплексов при сохранении базового функционала, вероятно, позволит в определенной мере воспроизвести процессы, происходившие на разных этапах эволюции БИС.

Заключение

Такие подходы, основанные создании моделей простых негэнтропийных агентов, соответствующих физическим принципам, лежащим в основе функционирования биологических систем и их объединения, на основе эволюционных законов, позволяют надеяться на возможность создания биологически инспирированных комплексов с функциями, близкими к их прототипам. Моделирование эволюционного процесса объединения клеток в организме, возникновения их специализации при формировании мозга приведет к появлению у таких моделей системных функций, ориентированных на решение задач, связанных с долгосрочным прогнозированием, памятью, вниманием и другими высшими функциями вплоть до социальных.

Список литературы

1. Лийв Э.Х. Инфодинамика. Обобщённая энтропия и негэнтропия. Таллинн, 1998. 200 с.
2. Вернер Гитт. В начале была информация. Изд. «Диайпи», 2008. 352 с.
3. Калашников Ю.Я. Аспекты молекулярной биологической информатики. Изд. «lap Lambert Academic Publishing». 2013. 668 с.
4. Гуревич И.М., Евстигнеев М.П. Информационные характеристики органических молекул // Системы и средства информ. 2012. 22:2. 308–325.
5. Эшби У.Р. Принципы самоорганизации. Сб. «Принципы самоорг.». М.: Мир, 1966. 325 с.
6. Александров Ю.А. Психология XXI века. Разд. Психофизиология. М., 2003. С. 85.

7. Психофизиология: Учебник для вузов. 4-е изд. / Под ред. Ю.И. Александрова. СПб.: Питер, 2014. 464 с.
8. Brillouin L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1962. 351 p.
9. Schrodinger E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge : University Press, 1944. 92 p.
10. Крушинский А. Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия // *Российский журнал когнитивной науки*. 2015. Т. 2. № 1. С. 52–61.
11. Витяев Е.Е. Целенаправленность как принцип работы мозга // *ВЖГиС*. 2014. Т. 18. № 4/3. 1172–1183.
12. Brillouin L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1962. 351 p.
13. Ratushnyak A.S, Zapara T.A. Principles of cellular-molecular mechanisms underlying neuron functions // *J. Integ. Neurosci*. 2009; 8(4): 453–469.
14. L.E. Tsitolovsky, Consciousness, endogenous generation of goals and homeostasis // *Int J Gen Syst*. 2015. V 44. I 6. 655–666.
15. Nuno L. Barbosa-Morais et al. The Evolutionary Landscape of Alternative Splicing in Vertebrate Species // *Science* 21 December 2012. Vol. 338. No. 6114. P. 1587–1593.
16. Tourette C., Li B., Bell R. et al. A large scale Huntingtin protein interaction network implicates Rho GTPase signaling pathways in Huntington disease // *J. Biol. Chem*. 2014. V. 289. № 10. P. 6709–6726.
17. Проскура А.Л., Вечкапова С.О., Запара Т.А. и др. Реконструкция молекулярного интерактома в системе глутаматных синапсов // *ВЖГиС*. 2014. Т. 18. № 4/2. С. 1205–1218.
18. De Bo G., Leigh D.A. A molecular machine mimicking the ribosome: a molecule that makes molecules // *Med. Sci. Paris*. 2013. V. 29. № 5. P. 452–454.
19. Root-Bernstein M., Root-Bernstein R. The ribosome as a missing link in the evolution of life // *J. Theoretical Biology*. 2015. V. 367. P. 130–158.
20. Collins M.O., Husi H., Yu L., Brandon J.M. et al. Molecular characterization and comparison of the components and multiprotein complexes in the postsynaptic proteome. // *J. Neurochem*. 2006. 97:16–23.
21. Ramirez O.A., Couve A. The endoplasmic reticulum and protein trafficking in dendrites and axons. // *Trends. Cell. Biol*. 2011. 21: 219–227.
22. Vishnevsky O.V., Putinsev N.I., Zapara T.A. et al: Analysis of the cognitive properties of neural systems based on biofeedback. // *Russian Journal of Genetics: Applied Research* 11/2015. Vol. 5. No. 6. P. 609–615.
23. Red'ko V.G. Epistemological foundations of investigation of cognitive evolution // *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. 2016. Vol. 18. P. 105–115.
24. Red'ko V.G. Modeling of cognitive evolution: Agent-based investigations in cognitive science // In: Long Cheng L., Liu Q., Ronzhin A. (Eds.). *Advances in Neural Networks – ISNN 2016*. 13th International Symposium on Neural Networks, ISNN 2016, St. Petersburg, Russia, July 6–8, 2016, Proceedings, LNCS 9719. P. 720–730. Springer International Publishing Switzerland, 2016.

Секция 7

Адаптивное поведение и эволюционное моделирование

Ю.А. СКОБЦОВ¹, О.В. ЧЕНГАРЬ²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Севастопольский государственный университет
ya_skobtsov@list.ru, OVChengar@sevsu.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ «НАПРАВЛЕННОГО» МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РАСПИСАНИЯ

Рассматривается задача оптимизации производственного расписания на основе направленного муравьиного алгоритма с адаптивно-изменяемыми весами. Для оценки качества потенциальных решений используется объектно-ориентированная модель технологического комплекса механообработки. Определены правила перехода и расчета концентрации искусственного феромона в предложенных муравьиных алгоритмах. Исследовано влияние на эффективность оптимизации основных параметров муравьиного алгоритма относительно различных критериев.

Ключевые слова: *оптимизация, муравьиные алгоритмы, производственное расписание, объектно-ориентированные модели.*

Введение

Увеличением степени автоматизации промышленных предприятий влечет необходимость использования все более мощных интеллектуальных системах краткосрочного планирования производства, особенно внутрицехового планирования для построения производственного расписания загрузки технологического оборудования. Следует отметить, что использование классических методов оптимизации, которые явно или неявно предполагают различные упрощения при постановке задачи планирования, часто не дает приемлемых результатов. Эффективным средством для решения подобных задач является использование «биоинспирированных» методов оптимизации, которые позволяют получать субоптимальные решения проблем реальных производственных ситуаций за малое

время [1]. Муравьиные алгоритмы (МА) являются ярким представителем этого направления и основаны на использовании моделирования социального поведения колонии муравьев, как популяции потенциальных решений и изначально ориентированы на решение задач комбинаторной оптимизации, прежде всего, поиска различных путей на графах [2]. МА хорошо показали себя для решения задач комбинаторной оптимизации, одной из которых является задача составления производственных расписаний технологического оборудования гибких производственных систем (ГПС).

Целью работы является исследование влияния основных параметров МА на оптимизацию производственного расписания в ГПС, которое легко может быть адаптировано к заданным условиям с учетом дополнительных ограничений задачи.

Поскольку высокая вычислительная сложность и трудоемкость реальных задач оптимизации часто не позволяет использовать классические методы оптимизации, предложено использовать (МА) совместно с объектной моделью. Разработанные объектные модели описывают важнейшие характеристики систем и позволяют с приемлемой достоверностью проводить моделирование их функционирования. Объектные модели позволяют в МА в процессе поиска решений оценивать качество потенциальных решений.

Производственное расписание

Задача синтеза расписания работы ГПС заключается в том, чтобы для производственного участка с заданным технологическим маршрутом составить порядок обработки деталей с учетом реальных ограничений производственных ситуаций за короткое время. Модель такого процесса удобно представить в виде специального графа [3], который определяет порядок и длительность t_{ij} – моментов начала технологических операций O_{ij} . Совокупность чисел $\{t_{ij}\}$ ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_i$), удовлетворяющая производственным условиям, называется расписанием работы ГПС, или его графовой моделью $G(i)$ [3, 4].

Помимо соответствующего представления в виде графа процесса загрузки технологического оборудования в ГПС для адаптации МА к решению поставленной задачи, необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. Разработка схемы представления потенциального решения.
2. Определение правил коррекции концентрации искусственного феромона, которые определяют положительную обратную связь.

3. Разработка эвристики для определения предпочтительности дуги при поиске пути в графе.
4. Определение эвристики поведения муравья при построении решения в виде вероятности перехода.
5. Определение средства проверки выполнимости потенциального решения с учетом ограничений задачи.
6. Проверка адекватности модели.
7. Исследование влияния основных параметров МА на эффективность оптимизации относительно различных критериев.

Направленный муравьиный алгоритм

При решении задач в динамической среде пространство поиска решений может изменяться. Найденное оптимальное решение через некоторое время, вследствие изменений производственной среды, может стать неоптимальным и даже плохим. При решении таких задач используются специальные приемы, которые помогают отслеживать изменяющуюся производственную среду и строить «лучшие» решения. Муравьиные алгоритмы допускают простые модификации, которые позволяют достаточно эффективно решать этот класс оптимизационных задач.

Исходя из требований, предъявляемых к методам муравьиных колоний, была разработана модификация муравьиного алгоритма – «направленный» муравьиный алгоритм [5]. Эта модификация отличается от уже известных алгоритмов следующими особенностями:

- 1) вычисление вероятности перехода искусственного муравья в вершины первого уровня графоаналитической модели выполняется не случайным образом, а основано на анализе текущей производственной ситуации;
- 2) однозначно определяется количество искусственных муравьев в каждой популяции, включая «элитных» особей, зависящее от исправности и готовности к работе технологического оборудования на производственном участке;
- 3) определяется множество допустимых для посещения муравьями вершин, соответственно и список запрещённых вершин (*tabu list*), который формируется в соответствии с технологическим процессом и принадлежностью искусственных агентов к определённому типу оборудования («элитный» муравей);
- 4) используется глобальное правило изменения концентрации феромона на дугах графа, учитывающее не «лучшие», как принято считать, а

«худшие» пути прохода популяции искусственных муравьев с целью их улучшения на следующих итерациях;

5) предложено «направленно-пропорциональное» правило перехода между вершинами, основанное на эвристической информации, которая отображает текущую производственную ситуацию.

Рассмотрим подробнее особенности предложенного алгоритма.

1) Как уже отмечалось ранее, выбор муравьем очередной вершины не является случайным, а производится с учетом текущей производственной обстановки и учитывает особенности динамически изменяемой среды и эвристическую информацию, накопленную к этому моменту.

Вероятность перехода k -го муравья в вершину O_{ij} определяется соотношением (5.28).

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k=1}^l [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & O_{ij} \in N_{ij}^k, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & O_{ij} \notin N_{ij}^k, \end{cases} \quad (5.28)$$

где α – коэффициент значимости концентрации феромона; β – коэффициент значимости эвристической информации; τ_{ij} – концентрация феромона на дуге графа; η_{ij} – эвристическая информация; N_{ij}^k – перечень вершин O_{ij} доступных для k -го муравья.

2) Предпочтительность выбора вершины графоаналитической модели основывается на «направленно-пропорциональном» правиле перехода между вершинами, в отличие от некоторых известных модификаций муравьиного алгоритма [2], когда муравей определяет следующую вершину сначала случайным образом, а затем ориентируясь на величину феромона.

«Направленно-пропорциональное» правило перехода основывается на эвристической информации, которая определяется, как отношение времени выполнения технологической операции к запланированному времени изготовления детали Ts_i , которое в свою очередь корректируется после выполнения каждой технологической операции над партией деталей, согласно формуле

$$\eta_{ij} = \frac{To_{ij}}{Ts_i},$$

где To_{ij} – время выполнения технологической операции O_{ij} над партией деталей i -го типа; Ts_i – срок изготовления партии деталей i -го типа.

Избранная эвристика, формула расчета которой представлена формулой, выбрана не случайно, так как, даже не используя особенности муравьиного алгоритма, технологическое оборудование изберет не ту вер-

шину, в которой оно раньше освободится после выполнения очередной производственной операции, а тот узел, на котором партия деталей скорее закончит обработку. Это существенно расширяет круг поиска и позволяет быстрее найти субоптимальное решение.

3) На каждой итерации «направленного» муравьиного алгоритма все искусственные муравьи пошагово строят путь от начальной до конечной вершины графоаналитической модели. При этом в каждой вершине каждый муравей должен выбрать следующую дугу пути. Если муравей k находится в вершине O_{ij} , он выбирает следующую вершину $\in N_{ij}^k$ на основе расчёта вероятностей перехода.

Для расчёта концентрации феромона при переходе муравья на следующий узел графа используются «глобальные» правила, способствующие направленному поиску. Данные правила заставляют муравьев двигаться в сторону найденных «худших» решений с целью их «улучшения».

Эта стратегия отдаёт предпочтение эксплуатации пространства поиска и применяется после того, как решение построено, т.е. после прохождения всеми муравьями своего пути. Причём концентрацию феромона разрешается менять только «худшим» (в глобальном смысле) муравьям, которые построили неоптимальный путь. Таким образом, для каждой дуги графа концентрация феромона определяется в соответствии со следующим правилом:

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \quad \text{где} \quad \Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{n_k} \Delta\tau_{ij}^k(t).$$

При этом количество феромона, которое откладывает искусственный муравей, вычисляется в зависимости от заданного критерия оптимальности.

4) Для всех муравьёв предопределяется множество доступных для посещения вершин.

При исследовании эффективности используются три критерия эффективности, комбинации которых предполагается экспериментально исследовать для нахождения эффективного решения многокритериальной задачи оптимального в смысле Парето:

- минимизация нарушения крайних сроков заказов;
- минимизация длительности цикла изготовления деталей;
- минимизация времени переналадок оборудования.

Возможны различные постановки задачи оптимизации производственного расписания по этим параметрам. Во всех постановках требуется среди всех возможных путей графоаналитической модели найти такое решение, при котором полученные расписания будут наилучшими.

Исследование параметров

Для проведения исследований эффективности «направленного» муравьиного алгоритма необходимо провести ряд вычислительных экспериментов и произвести статистическую обработку полученных результатов, с целью определения следующих рациональных параметров «направленного» муравьиного алгоритма для различных критериев оценки качества полученного решения: максимальное число популяций муравьев n_i ; значение начальной концентрации феромона τ_0 при переходе муравьев в вершины разного типа (технологические или складские операции); значение положительной константы α , которая определяет влияние концентрации феромона; значение положительной константы β , которая определяет влияние эвристической информации.

В качестве критериев эффективности функционирования АТК рационально рассмотреть следующие:

- средний коэффициент загрузки технологического оборудования ($K_{зср} \rightarrow \max$), так как этот критерий включает в себя два других: длительность производственного цикла ($T_{ц} \rightarrow \min$) и время простоев технологического оборудования ($T_{п} \rightarrow \min$);
- «точно в срок» – нарушение крайних сроков изготовления заказа ($T_{ср} \rightarrow \min$), так как этот критерий является наиболее актуальным в реальной производственной обстановке.

Для решения поставленной задачи необходимо определить рациональные значения начальной концентрации феромона. После чего планируемую серию экспериментов с параметрами «направленного» муравьиного алгоритма целесообразно разбить на две части:

- а) определение значений положительных констант α и β ;
- б) определение максимального числа итераций «направленного» муравьиного алгоритма n_i .

От значений начальной концентрации феромона τ_0 во многом зависит величина вероятности перехода муравьев в вершины начального уровня, а как следствие результативность «направленного» муравьиного алгоритма. При проведении исследований значения τ_0 изменялись в пределах (0; 1).

Экспериментально было установлено, что при переходе искусственных муравьев из стартовой вершины, целесообразно величину начальной концентрации ферромона τ_0 положить равной 0,48 (при переходе «элитных» муравьев в вершины, обозначающие складские операции, и 0,16 (при переходе всех остальных муравьев в вершины, соответствующие технологическим операциям).

По одному из основных условий функционирования «направленного» муравьиного алгоритма число искусственных муравьев в одной популяции n_k строго определено и равно количеству технологического оборудования, что применительно к решаемой задаче соответствует 7 (6 ГПМ и автоматический транспорт). Причём в дальнейшем будет рассматриваться вариант, когда всё оборудование исправно и готово к производству.

Для наилучшей эффективности «направленного» муравьиного алгоритма, его коэффициенты необходимо подбирать непосредственно для каждого отдельного случая. Значения положительной константы α , определяющей влияние концентрации феромона, изменяли в диапазоне (0,3; 0,5), а коэффициента β , обуславливающего влияние эвристической информации, варьировали в диапазоне (0,5; 0,8). В ходе проведенных испытаний для выбранного производственного участка были рассмотрены различные значения коэффициентов α и β и их комбинаций для предложенной задачи по двум критериям эффективности в отдельности. На рис. 1 представлены зависимости Kz_{cp} от величины положительной константы β при значении α равном 0,3; 0,35 и 0,4 соответственно.

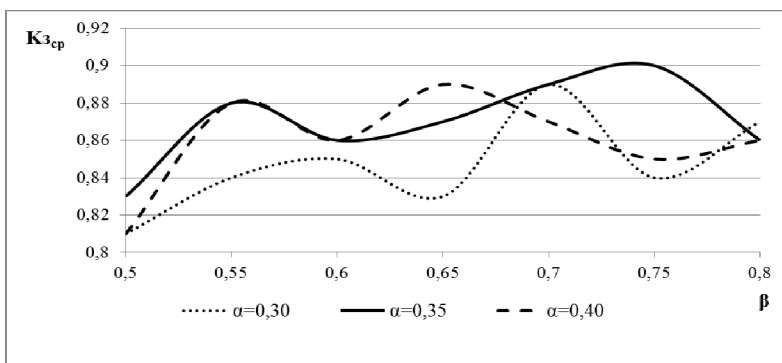


Рис. 1. Зависимость среднего коэффициента загрузки технологического оборудования от значений управляющих коэффициентов α и β

Анализ полученных зависимостей величины среднего коэффициента загрузки от значения управляющих коэффициентов α и β показал, что в результате проведенных экспериментов наилучшее решение достигается при значении $\alpha = 0,35$ и $\beta = 0,75$.

На рис. 2 представлены зависимости T_{cp} от величины положительной константы β при значении α равном 0,32; 0,37 и 0,42 соответственно. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что наи-

меньшая разница между регламентированным и фактическим выполнением плановых работ достигается при значении $\alpha = 0,37$ и $\beta = 0,7$.

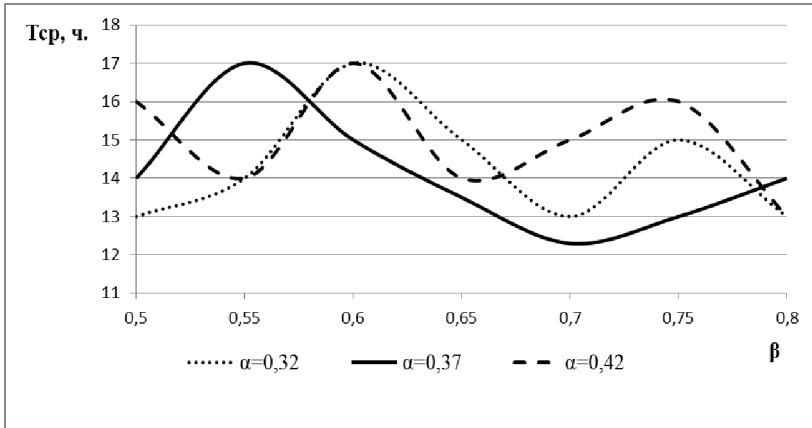


Рис. 2. Зависимость времени нарушения крайних сроков заказа от значений управляющих коэффициентов α и β

Таким образом, установив рекомендуемые параметры управляющих коэффициентов τ_0 , α и β , для различных критериев эффективности ($K_{зср} \rightarrow \max$ и $T_{ср} \rightarrow \min$) необходимо исследовать ещё один немаловажный параметр «направленного» муравьиного алгоритма, а именно количество итераций (популяций муравьев) n_t для получения субоптимального расписания загрузки технологического оборудования. Причём экспериментальные исследования проводились с учетом различных значений n_k , т.е. для различного количества технологического оборудования готового к работе (учитываются поломки ГПМ, плановый профилактический ремонт и просто снижение количества технологического оборудования в целях экономии ресурсов). Так рассматривалась ситуация с выходом из строя сначала одного ($n_k = 6$), а затем двух ГПМ ($n_k = 5$). Результаты проведенных экспериментов приведены на рис. 3 и 4 соответственно.

Очевидно, что максимальное значение среднего коэффициента загрузки технологического оборудования должно стремиться к $K_{з\max} = 1$, а минимальное значение времени нарушения крайних сроков заказа — к $K_{ср\min} = 0$. Поэтому для проверки эффективности полученных решений необходимо произвести сравнение полученных результатов с оптимальными значениями.

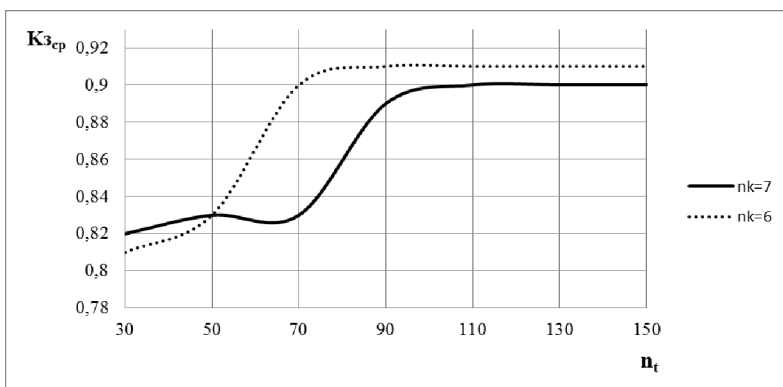


Рис. 3. Зависимость среднего коэффициента загрузки технологического оборудования ($K_{з,сп}$) от количества популяции муравьев n_t при различном числе искусственных муравьев n_k

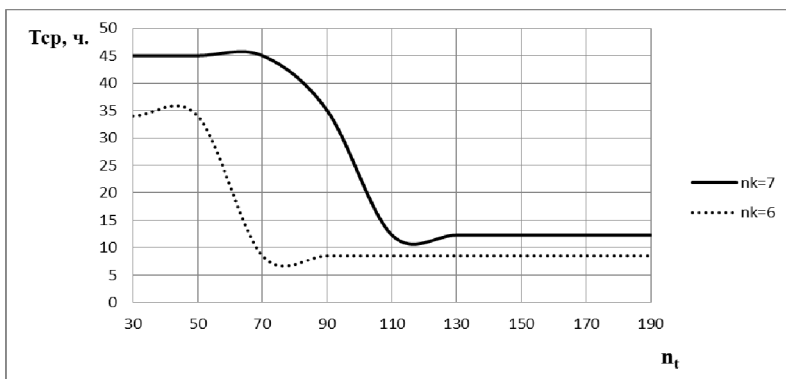


Рис. 4. Зависимость времени нарушения крайних сроков заказа ($T_{сп}$) от количества популяции муравьев n_t при различном числе искусственных муравьев n_k

Анализ зависимости среднего коэффициента загрузки технологического оборудования ($K_{з,сп}$) от количества популяций муравьев и количества итераций для «направленного» муравьиного алгоритма ($K_{з,сп} \rightarrow \max$) показал, что при различном числе итераций и количестве технологического оборудования происходит приближение к оптимальному значению ($K_{з,макс} = 1$).

Также анализ полученных результатов показал, что существует взаимосвязь между количеством популяций и количеством муравьев в каждой

популяции. Так с увеличением количества муравьев увеличивается количество итераций, а соответственно и время поиска решения, что является критичным в реальных производственных условиях. Поэтому в качестве рациональных параметров рекомендуется выбрать при $n_k = 7$ $n_t = 110$, а при $n_k = 6$ $n_t = 80$.

Выводы

Предложен «направленный» муравьиный алгоритм для оптимизации расписания производственного участка, для которого определена предпочтительность выбора вершины графа, основанная на «направленно-пропорциональном» правиле перехода и выбраны «глобальные правила» для расчёта концентрации феромона при переходе муравья на следующий узел графа, способствующие направленному поиску. Установлен и обоснован размер популяции искусственных муравьёв, соответствующий количеству технологического оборудования, задействованного в производстве (ГПМ и транспорт), при этом для всех агентов, кроме «элитного», определён список запрещённых вершин (tabu list). В результате проведенных компьютерных экспериментов на контрольном примере установлено, что эффективность направленного муравьиного алгоритма растёт при увеличении размерности задачи и для наилучших результатов его функционирования, коэффициенты алгоритма α , β и n_t необходимо экспериментально подбирать для каждой задачи.

Список литературы

1. Скобцов Ю.А., Сперанский Д.В. Эволюционные вычисления: учебное пособие. М.: Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2015. 331 с.
2. Dorigo M. Swarm Intelligence. Ant Algorithms and Ant Colony Optimization. Reader for CEU Summer University Course «Complex System», Budapest, Central European University, 2001. P. 1–3.
3. Ченгарь О.В., Скобцов Ю.А. Разработка «направленного» муравьиного алгоритма для оптимизации производственного расписания // Вестник Херсонского национального технического университета, ISBN 5-7763-2514-5. г. Херсон, 2013. № 1(46) С. 212–217.
4. Скобцов Ю.А., Секирин А.И., Землянская С.Ю., Ченгарь О.В., Скобцов В.Ю. Объектно-ориентированное моделирование и эволюционные алгоритмы // Труды 7-й Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование» (ИММОД-2015). ISBN 978-5-91450-173-7. Т. 2. М.: ИПУ РАН, 2015. С. 338–343.
5. Скобцов Ю.А., Ченгарь О.В. Объектно-ориентированное моделирование и муравьиные алгоритмы // Труды Международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование – 2016 (КОМОД-2016)». СПб: СПбПУ, 2016. С. 215–224.

Секция 8

Теория нейронных сетей

**Я.М. КАРАНДАШЕВ, Б.В. КРЫЖАНОВСКИЙ,
М.Ю. МАЛЬСАГОВ**

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва
kryzhanov@mail.ru, karandashev@niisi.ras.ru, malsagov@niisi.ras.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ ИЗИНГА КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ

Численными методами исследована зависимость термодинамических характеристик двумерной модели Изинга от числа спинов N . Произведено обобщение решения Онсагера на случай решетки конечных размеров и получены аналитические выражения для свободной энергии и её производных, хорошо описывающие результаты эксперимента. Показано, что с ростом N теплоемкость в критической точке возрастает логарифмически. Указаны ограничения на точность определения критической температуры, обусловленные конечным размером системы.

Ключевые слова: *статсумма, нормировочная константа.*

Введение

Вычисление статистической суммы (нормировочной константы) является центральной задачей статистической физики. Решив эту задачу для системы конечных размеров, удастся существенно продвинуться в развитии методов глубокого обучения и обработки изображения. К сожалению, решить эту задачу точно удалось только для небольшого ряда моделей, описанных в классических монографиях [1, 2]. Развитые статфизические подходы использованы для исследования свойств ассоциативной памяти [3]–[6] и разработки методов обучения нейронных сетей [7]–[9] конечных размеров.

В последнее время большой прогресс достигнут в численных методах, направленных на исследование критических показателей [10]–[13] и спектра энергий спиновых систем [14]. Основным алгоритмом в такого рода исследованиях является метод Монте-Карло [15, 16], позволяющий делать приближенные оценки. Однако появились алгоритмы [17]–[20], позволяющие точно вычислять свободную энергию конечномерной планарной

спиновой решетки. Исследователи стараются проводить расчеты с возможно большим числом спинов N , чтобы наилучшим образом аппроксимировать физические результаты, соответствующие пределу $N \rightarrow \infty$. Однако возможности численного счета ограничены и всегда остается открытым вопрос «достаточно ли велика размерность задачи»?

Целью настоящей работы является исследование зависимости параметров системы от размерности задачи N и получение аналитических выражений, пригодных при конечных значениях N . Полученные ниже результаты позволяют оценить, насколько велика должна быть размерность задачи, чтобы результаты численных расчетов удовлетворительно описывали свойства физических моделей. Кроме того, наличие аналитических выражений позволит использовать их для глубокого обучения нейронных сетей конечного размера и алгоритмов обработки изображений.

Исходные выражения

Нас интересует свободная энергия системы:

$$f = -\ln Z / N, \quad (1)$$

где статистическая сумма $Z = \sum_S e^{-N\beta E(S)}$ есть сумма по всем возможным конфигурациям спинов, $E = -\sum J_{ij} s_i s_j / 2N$ – энергия системы, $s_i = \pm 1$, а β – обратная температура. Знание свободной энергии позволяет вычислять основные измеряемые параметры системы, такие как внутренняя энергия U , дисперсия энергии σ^2 и теплоемкость C :

$$U = \frac{\partial f}{\partial \beta}, \quad \sigma^2 = -\frac{\partial^2 f}{\partial \beta^2}, \quad C = -\beta^2 \frac{\partial^2 f}{\partial \beta^2}. \quad (2)$$

Эксперимент мы проводили для планарной модели, в которой спины расположены на квадратной решетке, а взаимодействие имеется только с ближайшими четырьмя соседями $J_{ij} = J$. Решение Онсагера [21], полученное в пределе $N \rightarrow \infty$ для такой модели с периодическими граничными условиями, имеет вид:

$$f(\beta) = -\frac{\ln 2}{2} - \ln(\cosh 2\beta J) - \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \ln\left(1 + \sqrt{1 - k^2 \cos^2 \theta}\right) d\theta, \quad (3)$$

где $k = 2 \sinh 2\beta J / \cosh^2 2\beta J$. Это решение описывает логарифмическую расходимость теплоемкости при $\beta \rightarrow \beta_{ONS}$, где критическая температура определяется из условия $k = 1$ в виде:

$$\beta_{ONS} = \frac{1}{2} \ln(1 + \sqrt{2}). \quad (4)$$

Экспериментальные результаты

В настоящей работе для подсчёта свободной энергии спиновой системы на квадратной двумерной решётке мы интенсивно использовали алгоритм Кастелейна-Фишера [17, 18]. Этот алгоритм является точным, поскольку вычисление статистической суммы (статсуммы) в нем сводится к вычислению детерминанта некоторой матрицы, строящейся в соответствии с рассматриваемой моделью. Алгоритм позволяет за полиномиальное время точно вычислять свободную энергию спиновой системы для произвольного планарного графа с произвольно заданными связями. Подробнее об алгоритме можно прочитать в работе [19]. В настоящей работе мы использовали имплементацию алгоритма, предложенную в [20], которая давала совпадающие с [19] результаты, но оказалась значительно быстрее. При помощи этого алгоритма нам удалось проанализировать поведение свободной энергии и её производных (внутренняя энергия U и теплоёмкость C) для ряда решёток различных размеров $N = L \times L$. Линейный размер решетки варьировался от $L = 25$ до $L = 10^3$. Подчеркнем, что используемый нами алгоритм применим только к планарным решеткам. Это означает, что мы рассматривали только случай решеток со свободными граничными условиями, поскольку решетка с периодическими граничными условиями не является планарным графом. Соответственно, энергия основного состояния имеет вид:

$$E_0 = -2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{N}} \right). \quad (5)$$

В ходе эксперимента вычислялась свободная энергия $f = f(\beta)$ и ее производные. Как и ожидалось, пик кривой $C = C(\beta)$ сдвинут вправо от пика кривой $\sigma^2 = \sigma^2(\beta)$. По положению пика теплоемкости определялась критическая температура β_c и критические значения $f_c = f(\beta_c)$, $U_c = U(\beta_c)$, $\sigma_c = \sigma(\beta_c)$ и $C_c = C(\beta_c)$. По положению пика дисперсии энергии определялась вторая критическая точка β_c^* и соответствующие критические значения $f_c^* = f(\beta_c^*)$, $U_c^* = U(\beta_c^*)$, $\sigma_c^* = \sigma(\beta_c^*)$ и $C_c^* = C(\beta_c^*)$. Значения всех этих величин приведены в табл. 1.

Результаты эксперимента и анализа данных представлены ниже в графическом виде на рис. 1–4. Как видно из рис. 1, экспериментально полученные значения свободной энергии и внутренней энергии при увеличении размерности приближаются к решению Онсагера. Показаны кривые только для небольших линейных размеров $L = 25, 50, 100$. При $L > 100$ графики уже фактически сливаются с решением Онсагера и потому не отображены на рисунке. В соответствии с (5) асимптотическое поведение свободной энергии при больших β описывается выражением

$$f \approx -2\beta \left(1 - \frac{1}{\sqrt{N}} \right). \quad (6)$$

Именно наличие члена $\sim 1/\sqrt{N}$ приводит к тому, что кривые для малых линейных размеров не сливаются с решением Онсагера.

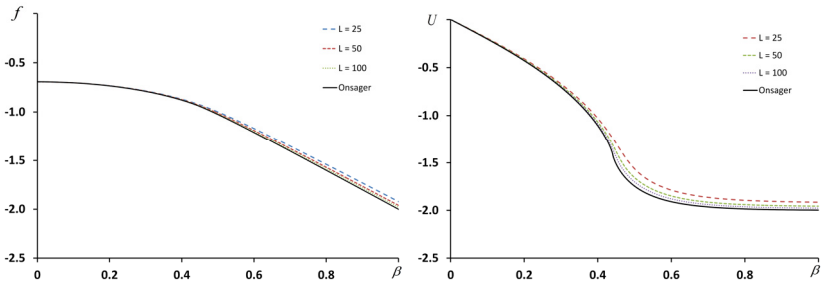


Рис. 1. Графики свободной энергии $f(\beta)$ (слева) и внутренней энергии $U(\beta)$ (справа) для небольших линейных размеров решётки и асимптотическое решение Онсагера ($L \rightarrow \infty$)

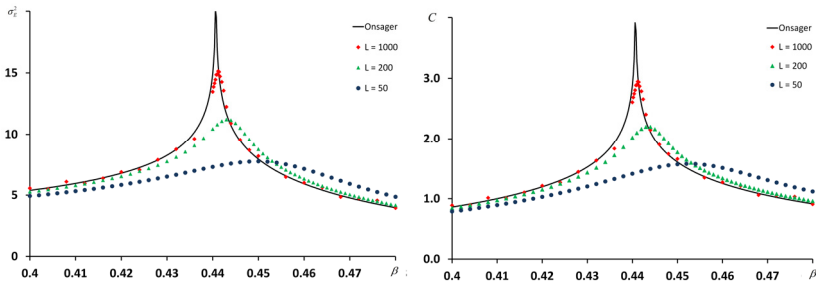


Рис. 2. Зависимость дисперсии σ_E^2 (слева) и теплоёмкости C (справа) от β для нескольких размеров решёток: от $N = 50 \times 50$ до $N = 10^3 \times 10^3$ (маркеры). Сплошной кривой показано решение Онсагера

Отличие между решением Онсагера и поведением $f(\beta)$ для случая решётки конечного размера лучше всего наблюдать на графике второй производной (теплоёмкости C). Согласно решению Онсагера теплоёмкость имеет логарифмическую расходимость при $\beta \rightarrow \beta_{ONS}$. Для решётки конечных размеров такого не происходит, однако пик теплоёмкости $C = C(\beta)$ действительно наблюдается – тем острее, чем больше размерность решётки (см. рис. 2). Более тщательный анализ вблизи пика теплоёмкости показал два результата. Во-первых, высота пика логарифмически зависит от размерности решётки. Во-вторых, положение пика немного сдвинуто вправо относительно β_{ONS} , но приближается к нему по мере роста размера решетки.

Таблица 1

Критические значения в пике теплоемкости / пике дисперсии энергии

L	β_c / β_c^*	f_c / f_c^*	U_c / U_c^*	σ_c / σ_c^*	C_c / C_c^*
25	0,4642 / 0,4556	0,9467 / 0,9351	1,3808 / 1,3288	2,4444 / 2,4678	1,2875 / 1,2642
50	0,4522 / 0,4494	0,9382 / 0,9344	1,3985 / 1,3768	2,7762 / 2,7849	1,5760 / 1,5664
100	0,4462 / 0,4454	0,9337 / 0,9326	1,4054 / 1,3978	3,0767 / 3,0782	1,8846 / 1,8797
200	0,4436 / 0,4432	0,9320 / 0,9314	1,4120 / 1,4075	3,3491 / 3,3502	2,2072 / 2,2046
300	0,4428 / 0,4422	0,9315 / 0,9306	1,4152 / 1,4078	3,4990 / 3,5001	2,4005 / 2,3955
400	0,4422 / 0,4418	0,9309 / 0,9304	1,4143 / 1,4091	3,6050 / 3,6052	2,5413 / 2,5369
500	0,4418 / 0,4418	0,9305 / 0,9305	1,4131 / 1,4131	3,6832 / 3,6832	2,6479 / 2,6479
600	0,4414 / 0,4414	0,9301 / 0,9301	1,4104 / 1,4104	3,7525 / 3,7525	2,7435 / 2,7435
700	0,4414 / 0,4414	0,9302 / 0,9302	1,4124 / 1,4124	3,8141 / 3,8141	2,8344 / 2,8344
800	0,4414 / 0,4414	0,9302 / 0,9303	1,4139 / 1,4139	3,8544 / 3,8544	2,8945 / 2,8945
900	0,4414 / 0,4414	0,9303 / 0,9303	1,4152 / 1,4152	3,8702 / 3,8702	2,9184 / 2,9184
1000	0,4412 / 0,4412	0,9301 / 0,9301	1,4132 / 1,4132	3,8914 / 3,8914	2,9477 / 2,9477

Анализ приведенных в табл. 1 результатов показывает, что положение пика (критическое значение β_c), а также зависимость критических значений свободной энергии и теплоёмкости от размерности решетки хорошо аппроксимируются выражениями:

$$\beta_c = \beta_{ONS} \left(1 + \frac{5}{4\sqrt{N}} \right).$$

$$U_c = -\sqrt{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{2\sqrt{N}} \right).$$

$$C_c = \frac{4\beta_c^2}{\pi} (\ln N - 1,7808).$$
(7)

Относительная ошибка при аппроксимации зависимости $\beta_c = \beta_c(N)$ выражением (7) достаточно мала: максимум ошибки $\sim 0,3\%$ имеет место при $L = 25$; с ростом L ошибка быстро спадает до значения $0,01\%$ при $L = 10^3$. Относительная ошибка аппроксимации величины U_c меньше $0,4\%$, а величины C_c меньше $0,8\%$. На рис. 3 показано соответствие формул (7) экспериментальным точкам.

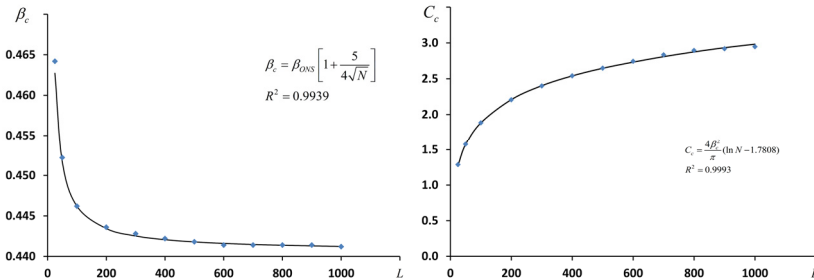


Рис. 3. Зависимость критической температуры β_c (слева) и теплоёмкости C_c (справа) от размера L : маркеры – данные эксперимента, сплошные кривые – аппроксимационные формулы (7)

Положение пика дисперсии энергии (критическое значение β_c^*) и соответствующие этому пику значения свободной энергии и теплоёмкости хорошо аппроксимируются (см. табл. 1) выражениями:

$$\beta_c^* = \beta_{ONS} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{N}} \right).$$

$$U_c^* = -\sqrt{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{N}} \right).$$

$$C_c^* = 1,197 \beta_{ONS}^2 \cdot (\ln N - 1).$$
(8)

Эти выражения находятся в хорошем согласии с данными эксперимента: максимальное значение относительной ошибки имеет место при $L = 25$ и составляет 0,6; 2,1 и 1,2 % для величин β_c^* , U_c^* и C_c^* соответственно; с ростом L величина относительной ошибки быстро падает и при $L = 10^3$ достигает значений 0,02; 0,03 и 0,08 % соответственно.

Обобщение решения Онсагера

Анализ показал, что можно получить аналитическое выражение, хорошо описывающее экспериментальные данные и полученные выше аппроксимационные выражения. Для этого в (3) достаточно произвести подстановку $2\beta J \rightarrow z$ и $k \rightarrow \kappa$, где

$$z = \frac{2\beta J}{1+\Delta}, \quad \kappa = \frac{2 \sinh z}{(1+\delta) \cosh^2 z}. \quad (9)$$

Тогда для свободной энергии, внутренней энергии и теплоемкости получим:

$$f(\beta) = -\frac{\ln 2}{2} - \ln(\cosh z) - \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \ln\left(1 + \sqrt{1 - \kappa^2 \cos^2 \theta}\right) d\theta, \\ U = -\frac{1}{1+\Delta} \left\{ 2 \tanh z + \frac{\sinh^2 z - 1}{\sinh z \cdot \cosh z} \left[\frac{2}{\pi} K_1 - 1 \right] \right\}, \quad (10)$$

$$C = \frac{z^2}{\pi \tanh^2 z} \left\{ a_1 (K_1 - K_2) - (1 - \tanh^2 z) \left[\frac{\pi}{2} + (2a_2 \tanh^2 z - 1) K_1 \right] \right\}.$$

где $K_1 = K_1(\kappa)$ и $K_2 = K_2(\kappa)$ – полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода соответственно и введены обозначения:

$$a_1 = p(1+\delta)^2, \quad a_2 = 2p-1, \quad p = \frac{(1 - \sinh^2 z)^2}{(1+\delta)^2 \cosh^4 z - 4 \sinh^2 z}. \quad (11)$$

Как и следовало ожидать, в пределе $N \rightarrow \infty$ из (11) следует $p \rightarrow 1$, $a_{1,2} \rightarrow 1$ и выражения (10) переходят в хорошо известные [1, 2]. Сравнение получаемых при этом выражений (10) с данными эксперимента показало, что наилучшее совпадение достигается, когда подгоночные параметры заданы в виде

$$\Delta = 5/4\sqrt{N}, \quad \delta = \pi^2 / N. \quad (12)$$

Выражения (10) хорошо аппроксимируют результаты эксперимента даже при относительно малом размере решетки. Для иллюстрации на

рис. 4 приведены графики для дисперсии энергии и теплоемкости для решетки размера $N = 25 \times 25$. Как видим, наблюдается хорошее согласие теории с экспериментом. С ростом размера решетки согласие теории с экспериментом существенно улучшается.

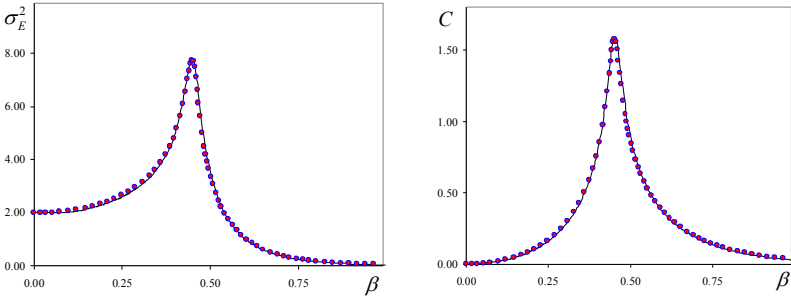


Рис. 4. Зависимость дисперсии (слева) и теплоемкости (справа) от β для решетки $N = 25 \times 25$: сплошные кривые построены по формулам (10), маркеры – данные эксперимента

Анализ выражений (10) показывает, что введение поправки на конечный размер решетки приводит к незначительным изменениям в поведении свободной и внутренней энергий. А вот в формуле для теплоёмкости пропадает логарифмическая расходимость в критической точке. Действительно, анализ выражений (10) показывает, что максимум теплоемкости достигается при $\sinh z = 1$, что соответствует критической температуре $\beta_c = \beta_{ONS}(1 + \Delta)$. Подставляя сюда Δ из (12) видим, что это выражение в точности совпадает с эмпирически установленным выражением (7).

Разлагая функцию $C(\beta)$ в окрестности критической точки β_c и опуская полиномиальные по $\beta - \beta_c$ члены получим:

$$C(\beta) \approx \frac{4\beta_c^2}{\pi} \left\{ 3 \ln 2 - \frac{\pi}{2} - \ln \left[4J^2 (\beta - \beta_c)^2 + \frac{\pi^2}{N} \right] \right\}. \quad (13)$$

Отсюда для критического значения теплоемкости вытекает выражение:

$$C_c = \frac{4\beta_c^2}{\pi} \left(\ln N + 3 \ln 2 - 2 \ln \pi - \frac{\pi}{2} \right), \quad (14)$$

что соответствует $(2 \ln \pi + \pi/2 - 3 \ln 2 \approx 1,7808)$ формуле (7).

Наличие выражений (10) позволяет провести анализ других характеристик, например корреляции и спонтанной намагниченности. Сначала рас-

смотрим зависимость от N корреляционной длины ξ . В пределе $N \rightarrow \infty$ она определяется известным выражением [1], которое мы представим в виде $\xi = -1/2 \ln \eta$, где $\eta = k / (1 + \sqrt{1 - k^2})$. Для перехода к случаю решетки конечного размера произведем здесь указанную в (9) подстановку $k \rightarrow \kappa$. Тогда для корреляционной длины получим:

$$\xi = -\frac{1}{2 \ln \bar{\eta}}, \quad \bar{\eta} = \frac{\kappa}{1 + \sqrt{1 - \kappa^2}}. \quad (15)$$

В критической точке $\beta = \beta_c$ величина $\kappa = \kappa(\beta)$ достигает своего максимума $\kappa_{\max} = 1/(1 + \delta)$, а корреляционная длина своего максимального значения $\xi_{\max} = L/2\pi\sqrt{2}$ которое на порядок меньше линейного размера решетки L .

Аналогичным образом совершим подстановку $k \rightarrow \kappa$ в полученное Янгом выражение [36]. Тогда для спонтанной намагниченности получим:

$$M_0 = \left[1 - \bar{\eta}^2 / \bar{\eta}_0^2\right]^{1/8}, \quad \bar{\eta}_0 \approx 1 / (1 + \sqrt{2\delta}) \quad (16)$$

($M_0 = 0$ при $\beta < \beta_c$). Подчеркнем, что интерпретация выражения (16) применительно к системе конечных размеров в корне отличается от случая $N \rightarrow \infty$. Как указано в [1], среднее значение намагниченности системы, размеры которой конечны, в отсутствие внешнего поля равно нулю, поскольку для любой конфигурации с $s_i = +1$ имеется равновероятная конфигурация с $s_i = -1$. Соответственно, выражение (16) применимо для описания следующего факта: измеряемая в эксперименте намагниченность в различные моменты времени может принимать любое значение между M_0 и $-M_0$.

Обсуждение и заключение

На основе экспериментальных данных мы получили простые оценочные выражения (7)–(8) для критических величин, хорошо согласующиеся с экспериментом. Конечно, подгоночные коэффициенты в этих выражениях можно было бы уточнить и выписать оценочные выражения с большей точностью. Однако мы не ставили перед собой такой цели – основной целью было установление тенденции изменений поведения критических параметров в зависимости от N .

Введением двух подгоночных параметров (12) получены аналитические выражения (10), обобщающие решение Онсагера на случай решетки

конечного размера. Эти выражения с большой точностью описывают поведение спиновой системы даже при малых ($N = 25 \times 25$) размерах решетки, а при $N \geq 50 \times 50$ их рассогласование с экспериментом становится меньше ошибки эксперимента.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Во-первых, численный эксперимент, как правило, позволяет правильно устанавливать характерные особенности поведения спиновой системы даже при относительно малых значениях N . Увеличение N позволит лишь уточнить значение критических параметров. Однако это уточнение не столь уж существенно: как следует из (7) точность определения критических величин β_c и U_c определяется величиной $\sim L^{-1}$. Трудно говорить об уточнении величины $C_c \sim \ln N$, поскольку увеличив размер задачи от $L = 10^3$ до $L = 10^4$ порядок мы всего лишь заметим ничего не говорящее нам изменение C_c на величину $\sim 30\%$.

Во-вторых, у систем конечных размеров исчезает предсказанная Онсагером логарифмическая расходимость теплоемкости в критической точке. То же самое справедливо и для дисперсии энергии. Этого и следовало ожидать из самых общих соображений. Вместо этого, мы наблюдаем логарифмическое нарастание критической величины теплоемкости типа $C_c \sim \ln N$. Казалось бы, при $N \rightarrow \infty$ мы переходим к пределу Онсагера ($C \rightarrow \infty$ при $\beta \rightarrow \beta_c$). Однако, такой переход на практике трудно осуществить: даже увеличив размер задачи до числа Авогадро $N \sim 10^{23}$ мы всего лишь в 4 раза изменим величину C_c по сравнению с рассмотренным нами случаем $N = 10^6$. Более того, зависимость удельной теплоемкости от N означает нарушение принципа аддитивности в классической системе, вполне заметное даже при $N \sim 10^{23}$: увеличение размера системы в два раза приведет к изменению величины C_c на 1,3%. Этот факт ничему не противоречит, поскольку нами рассмотрена модель со свободными граничными условиями, которая неаддитивна по определению. Как следует из (14) влиянием границ можно пренебречь только в пределе $\ln N \gg 2$, который в условиях численного эксперимента недостижим.

В-третьих, эксперимент показал, что пики кривых $\sigma_c = \sigma(\beta_c)$ и $C = C(\beta)$ не совпадают – пик теплоемкости достигается при больших значениях β . Это вполне ожидаемый результат, поскольку теплоемкость связана с дисперсией энергии соотношением $C(\beta) = \beta^2 \sigma^2(\beta)$. Однако встает

вопрос – по какому из пиков определять критическое значение температуры? Действительно, первый из пиков соответствует максимуму дисперсии энергии, а второй – максимуму корреляционной длины. Оба эффекта являются характерными признаками фазового перехода. Мы, по привычке, определяли критическую точку по пику теплоемкости. При больших размерах решетки такой подход вполне оправдан: при $N \geq 400 \times 400$ расстояние между этими пиками мы уже не могли зафиксировать. Однако, при меньших размерах зазор между пиками был хорошо заметен. Скорее всего, при интерпретации эксперимента на решетках малых размеров следует говорить, что фазовый переход размазан на температурном отрезке от β_c^* до β_c . Следовательно, численный эксперимент позволяет определить критическую температуру только с точностью до размера этого отрезка, т.е. абсолютная ошибка будет порядка величины $\pm \beta_{ONS} / 4n$.

Характер зависимости критических параметров от размера решетки проведен на примере двумерной модели Изинга. Однако мы полагаем, что основные выводы будут справедливы и для других моделей.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 16-31-00047 и № 15-07-04861.

Список литературы

1. Baxter R.J. Exactly solved models in statistical mechanics. // London: Academic Press. 1982.
2. Stanley H. Introduction to phase transitions and critical phenomena. // Clarendon Press. Oxford. 1971.
3. Amit D., Gutfreund H. and Sompolinsky H. Statistical Mechanics of Neural Networks Near Saturation. // Annals of Physics. 173. 30–67. 1987.
4. van Hemmen J.L., Kuhn R. «Collective Phenomena in Neural Networks» in Models of Neural Networks. // E. Domany, J.L. van Hemmen and K. Shulten. Eds. Berlin: Springer. 1992. P. 1–105.
5. Martin O.C., Monasson R., Zecchina R. Statistical mechanics methods and phase transitions in optimization problems. // Theoretical Computer Science. 265(1-2). 2001. P. 3–67.
6. Karandashev I., Kryzhanovsky B., Litinskii L. Weighted patterns as a tool to improve the Hopfield model. // Phys. Rev. E. 85. 041925. 2012.
7. Hinton G.E., Osindero S., Teh Y. A fast learning algorithm for deep belief nets. // Neural Computation. 2006. V. 18. P. 1527–1554.
8. Wainwright M.J., Jaakkola T. and Willsky A.S. A new class of upper bounds on the log partition function. // IEEE Trans. on Information Theory. 2005. 51(7). 2313–2335.
9. Yedidia J.S., Freeman W.T. and Weiss Y. Constructing free-energy approximations and generalized belief propagation algorithms. // IEEE Trans. on Information Theory. 2005. 51(7). 2282–2312.

10. Blote H.W.J., Shchur L.N., Talapov A.L. The cluster processor: new results. // International Journal of Modern Physics. 1999. С 10 (6). 1137–1148.
11. Häggkvist R., Rosengren A., Lundow P.H., Markström K., Andren D., Kundrotas P. On the Ising model for the simple cubic lattice. // Advances in Physics. 2007. V. 56. No. 5. P. 653–755.
12. Lundow P.H., Markstrom K. The critical behavior of the Ising model on the 4-dimensional lattice. // Phys. Rev. E. 80. 031104. 2009. Preprint arXiv:1202.3031v1.
13. Lundow P.H., Markstrom K. The discontinuity of the specific heat for the 5D Ising model. // Nuclear Physics B. 2015. 895. P. 305–318.
14. Dixon J.M., Tuszynski J.A., Carpenter E.J. Analytical expressions for energies, degeneracies and critical temperatures of the 2D square and 3D cubic Ising models. // Physica A. 2005. 349. 487–510.
15. Lyklema J.W. Monte Carlo study of the one-dimensional quantum Heisenberg ferromagnet near $T = 0$. // Phys. Rev. B. 1983. 27 (5). 3108–3110.
16. Marcu M., Muller J., Schmatzer F.-K. Quantum Monte Carlo simulation of the one-dimensional spin-S xxz model. II. High precision calculations for $S = 1/2$. // J. Phys. A. 1985. 18 (16). 3189–3203.
17. Kasteleyn P. Dimer statistics and phase transitions. // J. Math. Phys. 1963. 4(2).
18. Fisher M. On the dimer solution of planar Ising models. // J. Math. Phys. 1966. 7(10).
19. Karandashev Ya.M., Malsagov M.Yu. Polynomial algorithm for exact calculation of partition function for binary spin model on planar graphs. // Optical Memory & Neural Networks (Information optics). 2017. V. 26. No. 2. <https://arxiv.org/abs/1611.00922>.
20. Schraudolph N. and Kamenetsky D. Efficient exact inference in planar Ising models. // In NIPS. 2008. <https://arxiv.org/abs/0810.4401>.
21. Onsager L. Crystal statistics. I. A two-dimensional model with an order–disorder transition. // Phys. Rev. 1944. 65 (3–4). 117–149.
22. Yang C.N. The Spontaneous Magnetization of a Two-Dimensional Ising Model. // Phys.Rev. 1952. 65. 808.

М.С. ТАРКОВ

Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, г. Новосибирск
tarkov@isp.nsc.ru

РЕДУКЦИЯ СИНАПСОВ СЕТИ ХОПФИЛДА

На основе аналогии с осцилляторными сетями выполнено исследование влияния сокращения числа связей на поведение автоассоциативной сети Хопфилда. Показано, что исключение связей с весами, модули которых строго меньше максимального для данного нейрона, существенно повышает качество работы сети. При этом доля искаженных элементов

входного вектора сети, фильтруемых сетью, возрастает с увеличением его размерности.

Ключевые слова: *сеть Хопфилда, правило Хебба, метод проекций, химеры, редукция синапсов.*

Введение

Структура сети Хопфилда [1, 2] представляется в виде системы с непосредственной обратной связью выхода со входом. Выходные сигналы нейронов являются одновременно входными сигналами сети: $x_i(t) = y_i(t-1)$, $i = 1, \dots, N$, N – количество нейронов сети, $t = 0, 1, 2, \dots$. В классической сети Хопфилда отсутствует связь выхода нейрона с собственным входом, что соответствует $w_{ii} = 0$, а матрица весов является симметричной: $W = W^T$. Предположим, что каждый нейрон имеет функцию активации

$$y_i = \operatorname{sgn}\left(\sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} x_j\right), \quad i = 1, \dots, N, \quad \operatorname{sgn}(a) = \begin{cases} 1, & a > 0, \\ -1, & a \leq 0. \end{cases}$$

Основную зависимость, определяющую сеть Хопфилда, можно представить в виде

$$y_i(t) = \operatorname{sgn}\left(\sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} y_j(t-1)\right) \quad (1)$$

с начальным условием $y_j(0) = x_j$.

В процессе функционирования сети Хопфилда можно выделить два режима: обучения и классификации. В режиме обучения на основе известных векторов вычисляются весовые коэффициенты сети. В режиме классификации при фиксированных значениях весов и вводе конкретного начального состояния нейронов возникает переходный процесс вида (1), завершающийся в одном из локальных минимумов, для которого $y(t) = y(t-1)$. При вводе обучающих векторов x^k , $k = 1, \dots, p$ веса w_{ij} вычисляются согласно обобщенному правилу Хебба

$$w_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^p x_i^k x_j^k. \quad (2)$$

Важным параметром ассоциативной памяти является ее емкость. Под емкостью понимается максимальное число запомненных образов, которые

классифицируются с допустимой погрешностью ε_{\max} . Показано [1], что при использовании для обучения правила Хебба и при $\varepsilon_{\max} = 0,01$ (1 % компонентов образа отличается от нормального состояния) максимальная емкость памяти $p_{\max} = 0,138 \cdot N$. Такую сеть будем называть далее сетью Хопфилда-Хебба.

Проекционный метод [3, 4] обучения сети Хопфилда имеет вид итерационной зависимости матрицы весов W от последовательности обучающих векторов x^k , $k = 1, \dots, p$:

$$\begin{aligned} y^k &= (W^{k-1} - E) \cdot x^k, \\ W^k &= W^{k-1} + \frac{y^k \cdot y^{kT}}{y^{kT} \cdot y^k} \end{aligned} \quad (3)$$

при начальных условиях $W^0 = 0$ (E – единичная матрица). В результате предъявления p векторов матрица весов сети принимает значение $W = W^p$. Применение этого метода увеличивает максимальную емкость сети Хопфилда до $p_{\max} = N - 1$. Далее такую сеть будем называть проекционной.

Одной из проблем аппаратной реализации нейронных сетей является большое количество межнейронных связей (синапсов) [5–8]. Для автоассоциативных сетей Хопфилда эта проблема является наиболее острой в силу их полносвязности. Выходом является редукция (исключение) малозначимых связей [9]. Целью данной работы является разработка метода редукции связей и исследование влияния редукции связей на качество работы сети.

1. Редукция осцилляторной сети

Сеть из N осцилляторов [10, 11] может хранить двоичный вектор $x = (x_1, \dots, x_N)$, $x_i = \{-1, 1\}$,

$$x_i = \operatorname{sgn} \left\{ \sum_{j=1}^N w_{ij} \cdot x_j \right\}, \quad w_{ij} = \cos [\varphi_i(t) - \varphi_j(t)],$$

где $\varphi_i(t)$ – фаза i -го осциллятора.

При использовании правила Хебба (2) сеть осцилляторов хранит большое количество ложных образов (химер). С целью их исключения в [10] предложен способ модификации весов (1):

$$w'_{ij} = \begin{cases} +1, w_{ij} = +1; \\ -1, w_{ij} = -1; \\ 0, -1 < w_{ij} < +1. \end{cases} \quad (4)$$

Иными словами, исключаются связи с весами, модуль которых меньше 1, поскольку такие связи делают возможным появление химер [1].

2. Редукция сети Хопфилда

Правило (4) редукции весов можно перенести на произвольную сеть Хопфилда. Рассмотрим произвольную строку $w_i = (w_{i1}, \dots, w_{iN})$, $i \in \{1, \dots, N\}$ матрицы весов этой сети (вектор весов нейрона). Исходя из вида функции активации sgn , можно утверждать, что для этой функции важны лишь относительные величины элементов w_{ij} в строке w_i . Поэтому, не меняя результатов работы сети, можно нормировать величины w_{ij} следующим образом:

$$w_{ij} \leftarrow \frac{w_{ij}}{\max_{j=1, \dots, N} |w_{ij}|}.$$

Нормированные величины w_{ij} удовлетворяют неравенству

$$-1 \leq w_{ij} \leq 1.$$

Тогда можно ввести величину сдвига фазы $\varphi_{ij} = \arccos(w'_{ij})$ между компонентой $x_j(t) = \pm 1$ вектора входных сигналов i -го нейрона и его выходным сигналом $x_i(t+1) = \text{sgn}(\sum_{j=1}^N w_{ij} x_j(t))$, т.е.

$$x_i(t+1) = \text{sgn}(\sum_{j=1}^N x_j(t) \cdot \cos \varphi_{ij})$$

и, согласно [10], к коэффициентам $w_{ij} = \cos \varphi_{ij}$ можно применить преобразование (4), т.е. исключить из сети Хопфилда связи, имеющие веса $-1 < w_{ij} < 1$.

С целью сохранения симметрии матрицы весов правило редукции (4) для сетей Хопфилда приобретает следующий вид: вес w_{ij} обнуляется одновременно с весом w_{ji} при одновременном выполнении условий

$|w_{ij}| < |w_{i,\max}|$ и $|w_{ji}| < |w_{j,\max}|$, где $w_{i,\max}$ и $w_{j,\max}$ – максимальные веса в строках i и j соответственно.

3. Эксперименты

В экспериментах в качестве эталонных объектов использовались биполярные векторы, полученные кодированием изображений десятичных цифр (рис. 1) (черным пикселям ставится в соответствие -1 , белым пикселям $+1$). Эксперименты проводились для изображений с размерами 8×8 , 16×16 , 32×32 , 64×64 и 128×128 пикселей.



Рис. 1. Эталонные изображения

В табл. 1 представлены количества связей в сети Хопфилда до E_{before} и после E_{after} редукции, а также отношение этих величин (коэффициент сокращения числа связей). Из таблицы следует, что метод (2) позволяет сократить количество связей в сети Хопфилда-Хебба более чем на порядок.

Таблица 1

Количество связей в сети Хопфилда

$n \times n$	8×8	16×16	32×32	64×64	128×128
E_{before}	4032	65280	1047552	16773120	268419072
E_{after}	297	3840	64512	1044480	16744448
E_{after} / E_{before}	0,074	0,059	0,062	0,062	0,062

Установлено, что классическая сеть Хопфилда, обученная по правилу Хебба, не содержит химер (рис. 2), если количество хранимых эталонов не более 3, например, представленные на рис. 3.

При выполнении редукции связей в этой сети для всех изображений цифр размером 8×8 работа сети существенно улучшается, хотя не все изображения цифр восстанавливаются полностью даже при нулевом уровне шумов (искажений пикселей) (рис. 4).



Рис. 2. Химеры, порождаемые сетью Хопфилда, обученной по правилу Хебба, при числе эталонов, равном 10



Рис. 3. Пример эталонов, хранимых в сети Хопфилда, обученной по правилу Хебба



Рис. 4. Восстановленные изображения цифр размером 8×8 после редукции связей в сети Хопфилда-Хебба



Рис. 5. Пример зашумленных изображений цифр при уровне шума 57 %

Будем называть уровень шума (рис. 5) допустимым, если для заданного набора эталонных изображений сеть Хопфилда полностью фильтрует шум. При увеличении размеров изображений сеть Хопфилда-Хебба с редуцированными связями не только не порождает химер, но и позволяет повысить максимально допустимый уровень шума ξ_{Hebb} входных данных (табл. 2).

Попытка редукции связей в проекционной сети Хопфилда положительного результата не дала. В этом случае для эталонных изображений всех вышеуказанных размеров редуцированная сеть Хопфилда порождала искаженные изображения даже при отсутствии искажений во входных данных. Проведено исследование нередуцированной проекционной сети на устойчивость к шумам во входных данных. Результаты представлены в табл. 2.

Допустимый уровень шума ξ в процентах

$n \times n$	8×8	16×16	32×32	64×64	128×128
$\xi_{Projection}$	14	33	48	64	89
ξ_{Hebb}	–	3	22	57	88

В табл. 2 и на рис. 6 проводится сравнение редуцированной сети Хопфилда-Хебба и проекционной нередуцированной сети Хопфилда по допустимому проценту искаженных пикселей во входных данных. Из этого сравнения следует, что с увеличением размера хранимых изображений (числа нейронов сети Хопфилда) устойчивость к шумам ξ_{Hebb} редуцированной сети Хопфилда-Хебба приближается к соответствующему показателю $\xi_{Projection}$ проекционной сети Хопфилда. При этом количество связей в редуцированной сети более чем на порядок меньше числа связей классической сети Хопфилда.

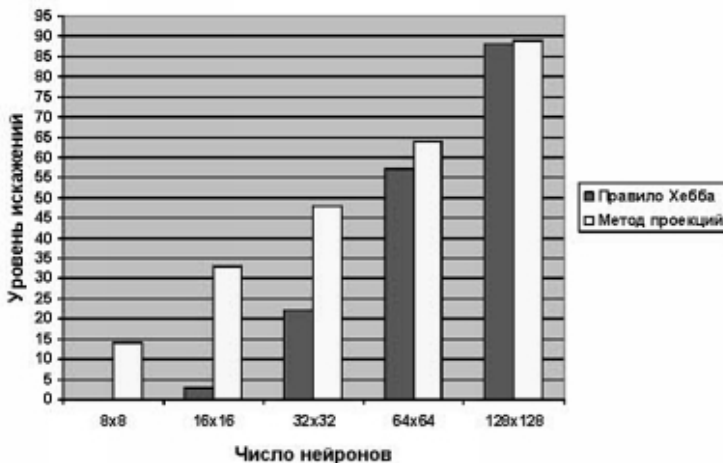


Рис. 6. Допустимый уровень процента искаженных пикселей

Заключение

Выполнено исследование влияние редукции связей сети Хопфилда на качество ее функционирования. Показано, что:

1. Редукция связей в сети Хопфилда-Хебба существенно улучшает качество ее функционирования. С ростом размерности хранимых векторов не только исчезают химеры, но и возрастает допустимый уровень шума во

входных данных. При этом для векторов размером 8×8 , 16×16 , 32×32 , 64×64 , 128×128 количество связей сети сокращается в $13 \div 17$ раз, т.е. более чем на порядок.

2. Редукция связей в проекционной сети Хопфилда ухудшает качество ее функционирования: в выходных данных сети появляются искажения даже при вводе эталонных векторов.

3. С ростом размерности хранимых векторов допустимый уровень шума для редуцированных сетей Хопфилда-Хебба приближается к соответствующему показателю для классических проекционных сетей Хопфилда.

Таким образом, с учетом гораздо меньшего числа связей в редуцированных сетях Хопфилда-Хебба эти сети при достаточно большой размерности хранимых векторов могут успешно конкурировать с классическими проекционными сетями Хопфилда.

Список литературы

1. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002.

2. Hopfield J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // Proc. National Academy of Science USA. 1982. Vol. 79. P. 2554–2558.

3. Personnaz L., Guyon I., Dreyfus G. Collective Computational Properties of Neural Networks: New Learning Mechanisms. In: Physical Review A. 1986. Vol. 34. No. 5.

4. Michel A. N., Liu D. Qualitative Analysis and Synthesis of Recurrent Neural Networks. Marcel Dekker Inc., NY, USA, 2002.

5. Hu S.G., Liu Y., Liu Z., Chen T.P., Wang J.J., Yu Q., Deng L.J., Yin Y., Hosaka S. Associative memory realized by a reconfigurable memristive Hopfield neural network // Nature Communications. 2015.

6. Тарков М.С. Сеть Хопфилда с межнейронными соединениями на основе мемристорных мостов // Труды XVIII Международной научно-технической конференции «НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2016». Ч. 3. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 91–100.

7. Tarkov M.S. Hopfield Network with Interneuronal Connections Based on Memristor Bridges // Proc. of the 13th International Symposium on Neural Networks (Advances in Neural Networks – ISNN 2016), Saint Petersburg, Russia, July 6–8, 2016, LNCS 9719. P. 196–203.

8. Tarkov M.S. Oscillatory neural associative memories with synapses based on memristor bridges // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2016. Vol. 25. No. 4. P. 220–228.

9. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети на персональном компьютере. Новосибирск: Наука, 1996.

10. Maffezzoni P., Bahr B., Zhang Z., Daniel L. Analysis and Design of Boolean Associative Memories Made of Resonant Oscillator Arrays. // IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2016. Vol. 63. No. 8. P. 1964–1973.

11. Maffezzoni P., Bahr B., Zhang Z., Daniel L. Oscillator Array Models for Associative Memory and Pattern Recognition. // IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2015. Vol. 62. No. 6. P. 1591–1598.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

- А –**
Алексеева С.А., 30
Кони́на А.А., 30
Крыжа́новский Б.В., 186
Кузнецов О.П., 74
Куливец С.Г., 74
- Б –**
Базенков Н.И., 74
Базян А.С., 148
Бойцова Ю.А., 40
Борисюк Р.М., 82
Бурилко О., 82
- В –**
Ванько С.Г., 40
Демарева В.А., 30
Дик О.Е., 158
Дудкин А.А., 91
Дьяконова В.Е., 74
- Г –**
Гариков О.Г., 98
Жиликова Л.Ю., 74
- Д –**
Данько С.Г., 40
Демарева В.А., 30
Дик О.Е., 158
Дудкин А.А., 91
Дьяконова В.Е., 74
- Е –**
Ефиторов А.О., 40
- Ж –**
Жариков О.Г., 98
Жиликова Л.Ю., 74
- З –**
Запара Т.А., 168
Зеленкина Д.А., 40
- И –**
Иванович Я.Б., 82
Карандашев Я.М., 186
Кнабенгоф М.А., 30
Князева И.С., 40
Ковалев В.А., 98
- К –**
Кона́ра А.А., 30
Крыжа́новский Б.В., 186
Кузнецов О.П., 74
Куливец С.Г., 74
- Л –**
Литвин А.А., 98
- М –**
Макаренко Н.Г., 40
Мальсагов М.Ю., 186
Марушко Е.Е., 91
Мейлихов Е.З., 11
- Н –**
Нарин С.Б., 30
Нарина И.С., 30
Петрушан М.В., 107
Подладчикова Л.Н., 107
Полевая С.А., 30
Проскура А.Л., 168
- О –**
Оатушняк А.С., 168
- П –**
Пара́ра А.И., 107
Самсонович А.В., 57
Сахаров Д.А., 74
Сидоров К.В., 48
Силькис И.Г., 64
Скобцов Ю.А., 176
Смирнитская И.А., 115, 123
Сорокоумов Е.Д., 168
Судаков С.К., 131, 139

– Т –

Тарков М.С., 197
Толоконников Г.К., 131, 139

– Ф –

Фарзетдинова Р.М., 11
Филатова Н.Н., 48

– Х –

Харыбина З.С., 21

– Ч –

Ченгарь О.В., 176
Черниговская Т.В., 30
Черноиванов В.И., 131, 139

– Ш –

Шапошников Д.Г., 107
Шемаев П.Д., 48

– Э –

Эйдлин А.А., 57

