Российская академия наук
Институт прикладной физики
Центр оптико-нейронных технологий НИИСИ
Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
Нижегородская государственная медицинская академия
ЗАО «Нижегородское агентство наукоемких технологий»

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2013

ТРУДЫ III ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2013

Программный комитет конференции

Крыжановский Борис Владимирович (Центр оптико-нейронных технологий НИИСИ РАН, Москва) – *председатель*
Александров Юрий Иосифович (Институт психологии РАН, Москва) – *зам. председателя*
Анохин Константин Владимирович (ГУ НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина РАМН, Курчатовский НБИК-центр, Москва) – *зам. председателя*
Сергеев Александр Михайлович (ИПФ РАН, Нижний Новгород) – *зам. председателя*
Черниговская Татьяна Владимировна (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург; Курчатовский НБИК-центр, Москва) – *зам. председателя*
Яхно Владимир Григорьевич (ИПФ РАН, Нижний Новгород) – *зам. председателя*

Антонец Владимир Александрович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Величковский Борис Митрофанович (Курчатовский НБИК-центр, Москва)
Гурбатов Сергей Николаевич (ННГУ, Нижний Новгород)
Григорьева Вера Наумовна (НГМА, Нижний Новгород)
Дорожкин Александр Михайлович (ННГУ, Нижний Новгород)
Дунин-Барковский Виталий Львович (Центр оптико-нейронных технологий НИИСИ РАН, Москва)
Жданов Александр Аркадьевич (ИТМиВТ РАН, Москва)
Еськов Валерий Матвеевич (Сургутский государственный университет, Сургут)
Иваницкий Алексей Михайлович (ИВНДиНФ РАН, Москва)
Казанцев Виктор Борисович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Кибрик Андрей Александрович (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)
Крылов Андрей Константинович (Институт психологии РАН, Москва)
Хилько Александр Иванович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Подладчикова Любовь Николаевна (НИИ НК ЮФУ, Ростов-на-Дону)
Полевая Софья Александровна (ННГУ, НГМА, Нижний Новгород)
Парин Сергей Борисович (ННГУ, Нижний Новгород)
Ратушняк Александр Савельевич (КТИ ВТ СО РАН, Новосибирск)
Редько Владимир Георгиевич (Центр оптико-нейронных технологий НИИСИ РАН, Москва)
Станкевич Лев Александрович (СПИИ РАН, Санкт-Петербург)
Самарин Анатолий Иванович (НИИ НК ЮФУ, Ростов-на-Дону)
Чернавский Дмитрий Сергеевич (ФИ РАН, Москва)
Чернавская Ольга Дмитриевна (ФИ РАН, Москва)
Шахов Борис Евгеньевич (НГМА, Нижний Новгород)
Щербаков Виталий Иванович (Педагогический университет, Нижний Новгород)

Редакционная коллегия:

В.А. Антонец, Н.Н. Кралина, И.В. Нуйдель, С.Б. Парин,
С.А. Полевая, А.М. Сергеев, В.Г. Яхно

Конференция организована при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-02-06119).

Электронный адрес оргкомитета: nuidel@appl.sci-nnov.ru
Веб-сайт конференции: http://www.nd-cogsci.iapras.ru/2013/

Предисловие

В этом сборнике содержатся краткие описания лекций, секционных и стендовых докладов, представленных на III Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» (Нижний Новгород, 24–27 сентября 2013 года). Конференция посвящена одному из прорывных направлений мировой науки, она становится традиционной, набирает силы и ресурсы. Можно надеяться, что конференция позволит консолидировать здоровые научные силы, несмотря на то что в современных условиях научным сотрудникам в России приходится противостоять процессу разрушения академической науки и образования [1].

Хотелось бы напомнить, что когнитивные исследования в последние десятилетия стали безусловным лидером мирового процесса познания, встав по популярности на один уровень с такими традиционными направлениями, как ядерная физика, нанотехнологии и т. п. Это вполне закономерно, поскольку проблемы понимания высших функций и патологических состояний мозга, нарастающая роль виртуальной среды в жизни каждого конкретного человека и человечества в целом настоятельно требуют новых знаний о структуре и механизмах человеческого сознания и, соответственно, новых возможностей для воздействия на это сознание и для квалифицированной защиты от завуалированных попыток подобного типа воздействий. В США необходимость проведения исследований механизмов работы мозга заявлена на государственном уровне. Президент Барак Обама выступил с предложением создания специальной программы «Brain Initiative» и выделения в 2014 году не менее 100 миллионов долларов на активное развертывание таких работ [2]. В частности, он сказал: «If we want to make the best products, we also have to invest in the best ideas... Every dollar we invested to map the human genome returned $140 to our economy... Today, our scientists are mapping the human brain to unlock the answers to Alzheimer's… Now is not the time to cut these job-creating investments in science and innovation. Now is the time to reach a level of research and development not seen since the height of the Space Race».

[«Если мы хотим производить лучшие товары, мы должны и деньги вкладывать в лучшие идеи... Каждый доллар, вложенный в составление карты генома человека, принес нашей экономике прибыль в 140 долларов... Сегодня наши ученые составляют карту мозга человека с целью открыть тайны болезни Альцгеймера… Сейчас не время экономить на инвестициях в науку и инновации, в результате осуществления которых создаются новые рабочие места. Сейчас время добиваться уровня исследований и разработок, невиданного со времен космической гонки»].

Евросоюз также готовит научный прорыв. «Более 1,2 миллиарда евро будут потрачены в ближайшие десять лет на создание компьютерной модели, которая должна объединить все научные знания о головном мозге человека. Этот масштаб финансирования ставит новый проект «Мозг человека» (Human Brain Project) в один ряд с такими программами, как полет на Луну или знаменитый проект «Геном человека» (Human Genome Project). Схожесть названий явно не случайна. Американские ученые десять лет назад представили миру последовательность нуклеотидов, составляющих ДНК человека, а европейские специалисты надеются через 10 лет создать максимально полную компьютерную модель мозга» [3, 4].

Многочисленные конференции по когнитивным исследованиям, в том числе и наша, показывают, что и в России есть научный потенциал и существенный задел для проведения и развития подобных исследований, который при финансировании, сопоставимом с западным, мог бы занять достойное место в мировой науке этого направления.

Хотелось бы также напомнить, что нижегородская «прописка» конференции неслучайна: почти полстолетия назад блестящий ученый и организатор науки Мария Тихоновна Грехова сумела собрать под одной крышей специалистов самых разных областей знаний (физиков, математиков, биологов, биофизиков, медиков, инженеров и др.), объединенных одной страстью – поиском истины в той междисциплинарной области, которую позднее назвали когнитивной наукой. Дар научного предвидения не подвел М.Т. Грехову и на этот раз: начатые по ее инициативе исследования с успехом продолжаются и по сей день, образовав целый веер перспективных направлений.

Достаточно обратиться к достижениям научной школы замечательного российского нейрофизиолога Александра Васильевича Зевеке. Профессор А.В. Зевеке, к несчастью, скончался в мае 2013 года, не дожив нескольких недель до своего 90-летия. Однако он дожил до тех дней, когда его теория интегративного кодирования сенсорной информации в кожном анализаторе [5, 6], пройдя классические для любой серьезной научной концепции этапы («полный абсурд» – «в этом что-то есть» – «возможно, это отчасти справедливо» – …), получила мировое признание [7]. Можно только порадоваться, что такие давно абсурдные для нейрофизиологов термины, как «ноцицепторы», «термоцепторы», покинут наконец-то страницы учебников.

В данном сборнике представлены работы, выполненные специалистами самых различных направлений: психологами, лингвистами, медиками, биофизиками, математиками, биологами, этологами, физиками. Но они все объединены единой междисциплинарной целью – это шаги к познанию сознания.

Большой блок составляют публикации концептуального характера, затрагивающие общетеоретические проблемы когнитивной науки.

Целый ряд сообщений посвящен различным аспектам моделирования высших психических функций: рассматриваются как общие, так и конкретные вопросы этой проблемы. Необходимо подчеркнуть, что эти публикации свидетельствуют о постепенном формировании консенсуса по поводу роли математического моделирования в когнитивной науке: модель – не самоцель, а один из ключевых методов исследования, призванный, прежде всего, выявлять пробелы в наших знаниях, полученных другими методами.

Методический блок докладов демонстрирует, в свою очередь, все более расширяющийся диапазон подходов к изучению когнитивных процессов. Объединяет эти сообщения стремление к наиболее точному измерению параметров организма в различных целевых контекстах.

В целом предлагаемый сборник материалов III Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» должен, прежде всего, стимулировать исследователей к объединению усилий по поиску новых решений в столь междисциплинарной области, как когнитивная наука.

1. Конференция научных сотрудников РАН «Настоящее и будущее науки в России. Место и роль Российской академии наук». Режим доступа: http://www.rasconference.ru.

2. Fact Sheet: BRAIN Initiative, For Immediate Release, April 02, 2013. URL: http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/04/02/fact-sheet-brain-initiative/

3. Генри Маркрам строит мозг в суперкомпьютере. Filmed Jul. 2009. Posted Oct. 2009. TEDGlobal 2009. URL: http://www.ted.com/talks/ lang/ru/henry_markram_supercomputing_the_brain_s_secrets.html.

4. Human Brain Project: подготовка идет полным ходом. Режим доступа: http://www. vechnayamolodost.ru/pages_1/drugienaukiozhizni/humbrprpoidpoho9c.html; http://www.dw.de/ европейцы-создадут-компьютерную-модель-мозга/a-16831469.

5. *Зевеке А.В., Полевая С.А.* Очувствленная кожа: специфичность паттернов вместо специфичности рецепторов // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях : труды II Всероссийской научной конференции с международным участием / Российская академия наук, Институт прикладной физики. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2011. С. 62–67.

6. *Zeveke A.V., Efes E.D., Polevaya S.A.* An integrative framework of the skin receptors activation: Mechanoreceptors activity patterns versus "labeled lines" // J. Integr. Neurosci. 2013. V. 12. P. 47–56.

7. *Abraira1 V.E., Ginty D.D.* The Sensory Neurons of Touch // Neuron. 2013. V. 79 (August 21). P. 618–639. (Elsevier Inc.).

С. Б. Парин, В. Г. Яхно

От теории к факту

Ю.И. Александров

Лаборатория психофизиологии им. В.Б. Швыркова, Институт психологии РАН, Москва
yuraalexandrov@yandex.ru

И.П. Павлов называл факты «воздухом науки». Особенность этого «воздуха» состоит в том, что он производится с помощью конвенциональных технологий. При этом конвенции разных исследователей могут существенно различаться. Настоящий доклад будет посвящен тому, чтобы сравнить факты, продуцируемые в одном и том же проблемном поле представителями разных парадигм, использующими принципиально различающийся теоретический инструментарий, предназначенный для производства научного знания.

В методологии науки факт – предложение, фиксирующее эмпирическое знание, достоверность которого экспериментально подтверждена. Эмпирические данные превращаются в факт путем интерпретации данных в терминах той или иной теории. Одни и те же эмпирические данные выступают как разные факты в результате их интерпретирования с позиций теорий разных парадигм.

В докладе будут проанализированы феномены, описывающие генез нейронных активаций, в том числе при электростимуляции мозга; изменения функционирования синапсов при научении; неравнозначность (неэквипотенциальность) функционирования структур мозга; этапность и согласованность морфо- и «функциогенеза»; связь характеристик активности нейронов «сенсорных» структур со свойствами среды; «когнитивность» в сравнении с «аффективностью» психологических и физиологических феноменов и др.

Интерпретация этих феноменов в терминах парадигм «активности» и «реактивности» приводит к продуцированию двух групп разных, внутрипарадигмально согласованных наборов фактов.

Данные, используемые в настоящем сообщении, получены в исследованиях, поддержанных грантами РГНФ (11-06-00917а), РФФИ (11-06-00340-а; 12-06-00077а) и Совета по грантам Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-3010.2012.6).

Что слышит ребенок в утробе матери?

В.А. Антонец, В.В. Казаков

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
ava@nant.ru

Достоверно известно, что с возраста около 20 недель плод реагирует на звуки. Более того, без воздействия звуков на плод его слуховая система не может формироваться и развиваться [1]. Она начинает функционировать еще до рождения ребенка, что подтверждается, например, тем, что только что родившиеся дети различают звуки родного языка [2]. В то же время число потенциальных источников звука, приникающего в утробу, весьма велико. Условно их можно разделить на внутренние, связанные с жизнедеятельностью организма, и внешние, связанные с действием различных источников звука и вибраций, а также с механическим взаимодействием тканей тела с окружающими объектами. Генерация слышимого звука происходит и при ультразвуковом диагностическом исследовании (УЗИ) вследствие модуляции радиационного давления ультразвуковой волны и/или нелинейных акустических свойств тканей, приводящих к самодетектированию ультразвуковых импульсов [3, 4].

При этом интуитивно считалось, что наиболее ясно ребенок слышит и воспринимает лишь голос родной матери, а звуки внешнего мира слабо проникают в материнскую утробу, поскольку разница акустических импедансов воздуха и биологических тканей велика. В действительности оказалось, что эти представления не верны. Высокая разница акустических импедансов действительно препятствует проникновению звука из одной среды в другую, если речь идет о случае его волнового распространения. В рассматриваемом же нами случае это не так. Действительно, на 6–9-м месяцах беременности характерный диаметр утробы d составляет 25–30 сантиметров. Поэтому при действии внешнего акустического поля в воздухе для частот ниже тех, которым соответствует длина продольной звуковой волны в свободном пространстве $\lambda >> d$, утроба находится в почти однородном поле. При этом мягкие биологические ткани ребенка и околоплодная жидкость могут рассматриваться как несжимаемые изотропные водоподобные среды, поскольку для них модуль сдвиговой упругости на несколько порядков ниже модуля всестороннего сжатия [5]. Это означает, что в данном диапазоне частот утроба испытывает деформацию всестороннего сжатия и звуковое давление внутри нее совпадает с внешним звуковым давлением. То есть в таком диапазоне частот внешние звуки должны проникать в утробу беспрепятственно.

Для проверки этого предположения была использована модель утробы, представляющая собой мягкую оболочку из полиэтиленовой пленки, заполненную 5 литрами воды. Для оценки степени проникновения внешнего звука в утробу были сопоставлены величины звукового давления в воздухе и внутри оболочки. Для контроля звукового давления внутри модельной оболочки в нее помещался гидрофон (Г) типа 8100 Bruel & Kjaer, не касающийся ее стенок. Для измерения давления в воздухе в качестве микрофона использовался второй гидрофон (М) типа 8100 Bruel & Kjaer. В качестве усилителей сигналов с датчиков использовались предусилители типа 2626 и 2635 Bruel & Kjaer. В качестве регистратора сигналов использовался анализатор спектра на базе компьютера со встроенной звуковой картой и программой SpectraLab.

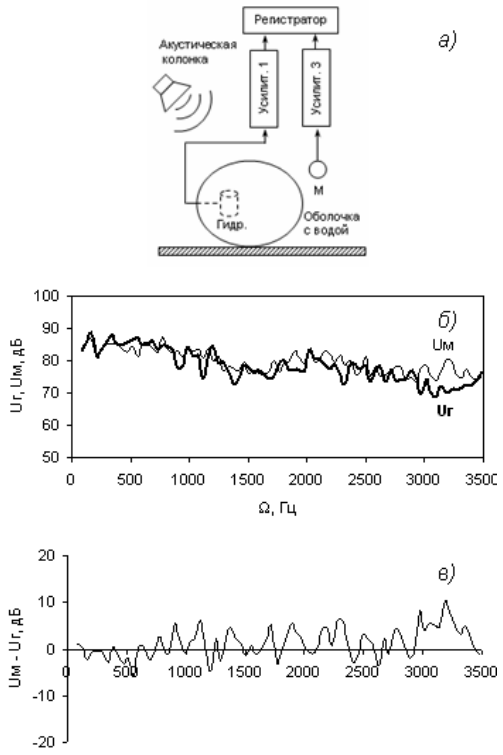


Рис. 1. Схема измерения (*а*) и графики частотной зависимости выходных сигналов $U_Г$ и Uм (*б*) и их отношение (*в*) при возбуждении оболочки звуком

На рисунке 1 приведены графики частотной зависимости выходных сигналов гидрофона и микрофона (Uм), а также их отношения. Видно, что до частот порядка 1 кГц максимальное отклонение не превышает 5 дБ, что можно считать приемлемым для решения поставленной задачи неинвазивной оценки звукового давления в утробе. На более высоких частотах оно уменьшается, хотя и неравномерно, в силу особенностей реверберации звука в помещении и дифракции звука на оболочке. Аналогичные результаты были получены и при

регистрации давления внутри оболочки с помощью фонорегистратора. Это означает, что даже певческое сопрано, не говоря о более низких голосах, практически беспрепятственно проникает из воздуха в полость с водой, а значит, и в утробу матери.

Таким образом, до частот порядка 1 кГц внешнее звуковое поле и возбуждаемое им звуковое поле в утробе можно просто отождествлять. Проникновение более высокочастотных составляющих звуков в утробу происходит слабее из-за влияния пространственной неоднородности звукового поля в воздухе. Если полагать, что плод слышит так же, как и после рождения, звуки будут казаться ему приглушенными, поскольку в диапазоне частот выше 1 кГц чувствительность уха имеет подъем [6].

Следует отметить, что при повторении опыта, когда через громкоговоритель или вибровозбудитель звучала речь или песни, то при аудиовоспроизведении записей, сделанных как фонорегистратором, так и гидрофоном, мы слышали разницу в тембровой окраске, но разборчивость была хорошей в обоих случаях.

Полученный результат позволяет иначе взглянуть на возможность неинвазивного измерения звукового давления в утробе, в том числе вызываемого иными, чем звуковое поле в воздухе, источниками. Дело в том, что скорость продольных звуковых волн в водоподобных биологических средах приблизительно в 5 раз выше, чем скорость звука в воздухе. Поэтому, если на поверхности живота беременной разместить заполненную водой небольшую мягкую оболочку, то при наличии акустического контакта между ними в рассматриваемом диапазоне частот оболочку и утробу можно считать единым сосредоточенным объемом несжимаемой жидкости, звуковое давление в котором однородно. Значит, если внутрь оболочки, размещенной на поверхности живота беременной, поместить гидрофон, то измеренное им звуковое давление должно совпадать со звуковым давлением в утробе.

Для проверки этого предположения было изготовлено устройство фонорегистратор (ФР). Он представляет собой заполненную водой мягкую герметичную полиэтиленовую оболочку (пакет) объемом 150 мл с помещенным внутрь нее гидрофоном, изготовленным с использованием пьезоэлемента в виде шара диаметром 20 мм. Далее на модели были последовательно проведены измерения двух типов: при возбуждении оболочки звуковым полем в воздухе и при возбуждении вибратором.

Сначала внутрь оболочки помещали гидрофон и фонорегистратор. Оболочку возбуждали акустическим полем в воздухе. Для этого с помощью перестраиваемого генератора сигналов AFG 3022B, усилителя мощности и звуковой колонки в пространство рабочего помещения излучался синусоидальный сигнал с плавно перестраиваемой частотой в диапазоне от 55 Гц (ля малой октавы) до 3520 Гц (ля IV октавы) за 240 с. На рисунке 2, *б* приведены графики частотной зависимости величин акустического давления, зарегистрированного фонорегистратором ФР ($U_{ФР}$) и гидрофоном Г ($U_Г$). На рисунке 2, *в* в логарифмическом масштабе приведена частотная зависимость их отношения. Видно, что до частот порядка 1 кГц это отношение отклоняется от единицы (0 дБ) не более, чем на ±5 дБ.

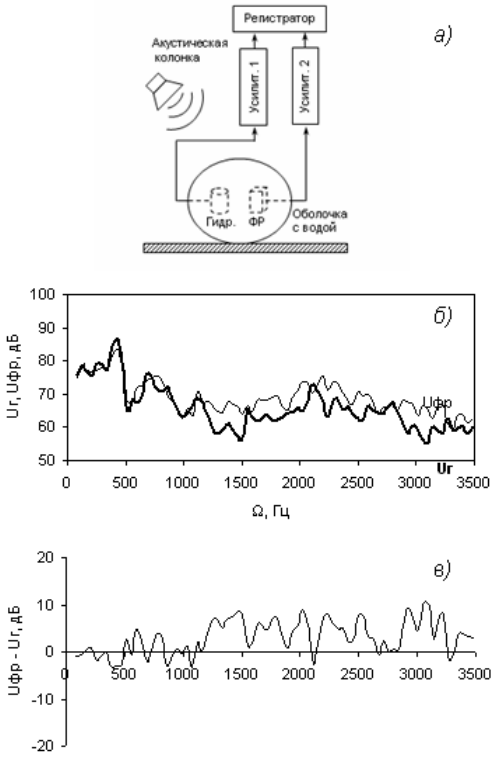


Рис. 2. Схема измерения (*а*) и графики изменения звуковых давлений в модели утробы, измеренные фонорегистратором $U_{ФР}$ и гидрофоном $U_Г$ (*б*) и их отношение (*в*)

Затем, не тревожа гидрофон, фонорегистратор аккуратно переместили на поверхность модели утробы и повторили измерение. На рисунке 3, *б* и *в* приведены графики частотной зависимости величин акустического давления, зарегистрированного фонорегистратором ФР и гидрофоном Г, а также их отношение. Видно качественное совпадение с результатами, приведенными на рис. 2, *б, в*. Отклонение также лежит в интервале ±5 дБ.

Была также изучена связь между величиной давления в воздухе и величиной давления в оболочке. Для этого на звуковую колонку подавался гармонический сигнал частоты 440 Гц (ля I октавы), амплитуду которого можно было изменять. Далее сравнивались величины выходных сигналов размещенного в воздухе микрофона и помещенного внутрь оболочки фонорегистратора. Как и следовало ожидать, эта зависимость оказалась практически линейной в исследуемом диапазоне давлений.

Для контроля были сопоставлены данные частотной зависимости отношения выходных сигналов гидрофона в первом и втором измерениях. Во всем использованном диапазоне частот и даже до частоты 2 кГц, это отношение не превышало ±2 дБ.

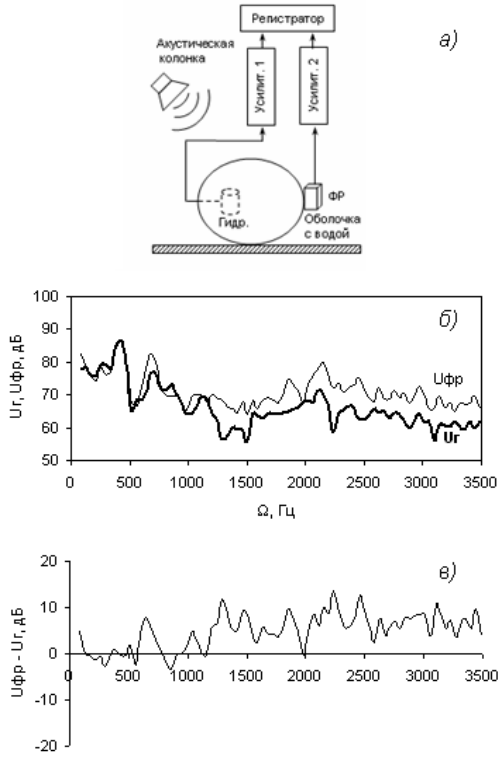


Рис. 3. Схема измерения (*а*) и графики частотной зависимости выходных сигналов $U_{ФР}$ и $U_{Г}$ (*б*) и их отношение (*в*) при размещении ФР на наружной поверхности оболочки

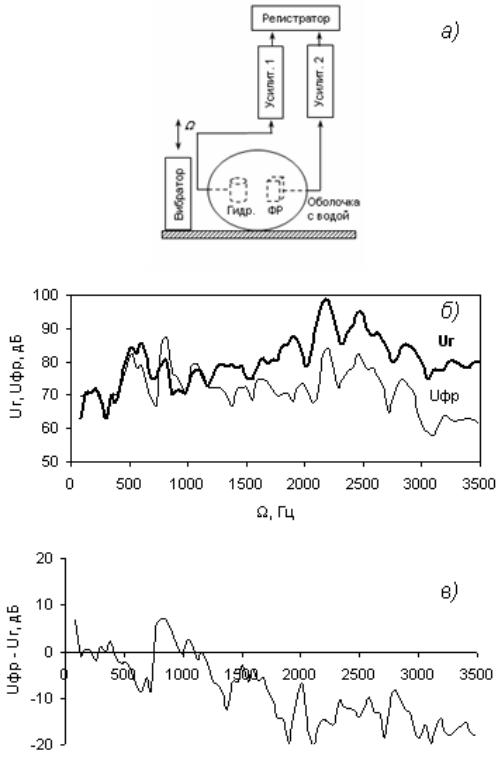


Рис. 4. Схема измерения (*а*) и графики частотной зависимости выходных сигналов $U_{ФР}$ и $U_{Г}$ (*б*) и их отношение (*в*) при возбуждении оболочки вибратором

Далее модель утробы возбуждали с помощью миниатюрного вибратора – вибрационной колонкой SP-V008 Age Star Inc. Вибратор располагался на лабораторном столе, дно оболочки при этом касалось стола. При проигрывании записанного в вибратор аудиофайла он возбуждал колебания стола, воздействовавшего на стенку мягкой оболочки, в том же частотном диапазоне перестройки частоты. На рисунке 4 приведены схема измерения и графики частотной зависимости величин акустического давления, зарегистрированного фонорегистратором и гидрофоном, а также их отношения. Видно, что в диапазоне частот до 1 кГц результаты качественно совпадают с приведенными на рис. 2 и рис. 3.

Таким образом, в диапазоне частот ниже 1 кГц, как в случае возбуждения внешним звуковым полем в воздухе, так и в случае возбуждения вибрационным воздействием, звуковые давления внутри соприкасающихся заполненных водой мягких оболочек близки друг к другу по амплитудно-частотным характеристикам. Поэтому звуковое давление в утробе может быть оценено по результатам неинвазивных измерений с помощью гидрофона, размещенного в мягкой оболочке, заполненной водоподобной жидкостью.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-02-01114).

Литература

1. *Graven S.N., Browne J.V.* Auditory Development in the Fetus and Infant // Newborn & Infant Nursing Reviews. 2008. V. 8, № 4. P. 187–193.

2. *Moon Ch., Lagercrantz H., Kuhl P.K.* Language experienced in utero affects vowel perception after birth: a two-country study // Acta Paediatrica. 2013. V. 102, № 2. P. 156–160.

3. *Мансфельд А.Д., Соколов А.В., Волков Г.П.* Самодетектирование акустических импульсов в ближней зоне акустического излучателя // Акуст. журн. 2011. Т. 57, № 3. С. 329–336.

4. *Fatemi M., Alizad A., Greenleaf J.F.* Characteristics of the audio sound generated by ultrasound imaging systems // J. Acoust. Soc. Am. 2005. V. 117, № 3. P. 1448–1455.

5. *Сковорода А.Р.* Задачи теории упругости в проблеме диагностики патологий мягких биологических тканей. М. : Физматгиз, 2006. 232 с.

6. Справочник по инженерной психологии / под ред. Б.Ф. Ломова. М. : Машиностроение, 1982. 388 с.

Динамика ритма сердца в стрессогенных информационных контекстах

А.В. Бахчина[1], С.Б. Парин[1], И.С. Шишалов[1], В.В. Кожевников[1], М.М. Некрасова[3], Д.С. Котикова[1], Н.В. Елизарьева[1], С.А. Полевая[2]

[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2]Институт прикладной и фундаментальной медицины Нижегородской государственной медицинской академии
[3]Нижегородский НИИ гигиены и профессиональной патологии
nastya18-90@mail.ru

Ритм сердца является интегративным отображением динамики энергообеспечения организма (В. Парин и др., 1970; Баевский, 2004; Acharya et al., 2004). Наиболее энергозатратным режимом для организма является стресс – экстремальный режим работы психофизиологической системы. Фактором запуска данной защитной реакции является информационный параметр – сигнал о чрезмерном рассогласовании двух образов: текущего и необходимого (С. Парин и др., 2011). Основываясь на теории функциональных систем П.К. Анохина (Анохин, 1973), можно разделить стресс-факторы в зависимости от блока функциональной системы, в котором возникает рассогласование. 1. Информационный фактор. На этапе выбора программы действия, реализующей удовлетворение актуальной потребности, возможно рассогласование – отсутствие необходимой программы в репертуаре выбора. 2. Физический фактор. На этапе запуска выбранной программы действия возможно рассогласование информации о текущем состоянии моторного блока (и о наличествующем уровне ресурсообеспечения) с информацией о необходимых для реализации программы ресурсах. 3. Аффективный фактор. Повышенная субъективная значимость актуальной потребности является фактором увеличения разницы между акцептором результата действия и образом реального результата. Вследствие этого возникает чрезмерное рассогласование на этапе обратной афферентации.

В классических определениях стресс-реакции подчеркивается ее неспецифичность, т. е. независимость от природы стресс-фактора (Селье, 1960; С. Парин, 2008). Однако в современных работах по исследованию физиологических реакций человека на различные типы экстремальных нагрузок можно обнаружить попытки игнорирования этой закономерности (см., например, детальный обзор von Borella et al., 2007).

В данной работе представлены результаты исследования вариабельности сердечного ритма в контекстах естественной деятельности, а именно:

1) публичное выступление (студенты, выступающие с научными докладами; 27 человек). В данном контексте присутствует аффективный стресс-фактор. Цена ошибок повышается ввиду наличия публики;

2) учебная тренировка в газово-дымовой камере (спасатели; 24 человека). В данном контексте присутствует физический стресс-фактор. Реализация программы действия (найти и вынести пострадавшего) в данных условиях (тяжелая сбруя, недостаток кислорода, пониженная видимость) требует должной физической подготовки и наличия высокого уровня ресурсообеспечения;

3) компьютерные игры (гонки Need for Speed Underground 2; студенты, 17 человек). Информационный контекст. Испытуемый управляет информационными образами в виртуальной реальности. Отсутствие эффективной программы действий приводит к ошибкам и, как следствие, к поражению;

4) вождение автотранспорта (водители общественного транспорта; 6 человек). Реализуется сложный контекст, включающий систему разнотипных стресс-факторов.

Предполагается, что стадийность стресс-реакции должна проявляться в неспецифических изменениях вегетативной регуляции сердечного ритма. Это значит, что в динамике частотных параметров вариабельности сердечного ритма (ВСР) следует ожидать характерные для стресс-реакции изменения параметров, универсальные для всех типов стресс-факторов.

Методы

В измерениях в каждом контексте реализовывается схема параллельного контроля параметров биологической системы – вариабельности сердечного ритма, и контекста – внешних стимулов.

Измерение вариабельности сердечного ритма (ВСР) производилось посредством телеметрической системы регистрации сердечного ритма. Данная система представляет собой миниатюрный датчик ZephyrBioHarness, который крепится к эластичному поясу, в который вшиты два тканевых электрода. Пояс крепится на тело человека таким образом, чтобы электроды располагались в 1 и 2 грудных отведениях. Размер пояса устанавливается таким, чтобы испытуемому было комфортно, и при этом различные движения не влияли на положение пояса.

Пакетная передача данных от датчика к мобильному устройству производится по беспроводному протоколу Bluetooth. Реализация связи, передачи и сохранения данных производится на мобильном устройстве через специализированное программное обеспечение – «HR-Reader». Программная среда «HR-Reader» обеспечивает on-line визуализацию регистрируемой динамики RR-интервалов для контроля чистоты и целостности записи. Интерфейс программы включает кнопки

(A, B, C, D, E, F) для контекстно-временного маркирования записи. Нажатие кнопки ставит соответствующий маркер напротив RR-интервала, во время которого произошло событие, сохраняя маркер в файле данных.

Контекст фиксируется следующими методами:

1. Временное протоколирование

Протоколирование событий вождения автотранспорта осуществлялось через заполнение бланка протокола (протокол движения был разработан для временной записи событий, сопровождающих процесс вождения, отражающих уровень напряженности деятельности), а также через маркирование наблюдателем записи физиологического сигнала средствами программного обеспечения, описанными выше. Наблюдатель располагался на переднем сидении в салоне автобуса для устранения возможности вмешательства в деятельность водителя. В функции наблюдателя входили контроль измерения физиологических параметров и протоколирование процесса движения.

2. Маркирование записей

Регистрация начала и окончания события в контекстах производилась через маркирование записи ритмограммы посредством кнопок (A, B, C, D, E, F) в программе регистрации сигнала. События контекста заранее кодируются системой символов. Маркеры фиксируются в записываемом файле напротив RR-интервала, совпадающего по времени с отметкой маркера.

Методы спектральной обработки ритмограмм

Согласно концепции В.В. Парина, параметры состояния биологической системы необходимо рассматривать как функцию от времени (В. Парин, 1970). Таким образом, при выявлении закономерностей и правил, заложенных в функцию, возможно предсказание динамики состояния на основе данных о прошлом и настоящем положении.

Частотные характеристики ВСР принято рассматривать как точку, вычисляемую из спектрограмм за 5-минутный отрезок ритмограммы (Баевский, 2001; European Society of Cardiology, 1996). При этом теряется возможность построения точной динамики, поэтому эффективней использование динамического спектра ритмограммы. В этом случае мы получаем временную развертку динамики частотных параметров, а значит, динамики состояния. То есть состояние описывают пространственно-временные паттерны – динамические структуры частотных параметров ВСР.

В данной работе спектральная обработка производилась специализированной программой, построенной в среде LabVIEW.

Данные в программу поступают в виде RR-интервалов, далее фиксируются временные характеристики этих RR-интервалов. Для этого производится последовательное сложение RR-интервалов и приведение в соответствие RR-интервала и времени по формуле

$$T_i = \sum_{k=1}^{i} rr_k \ .$$

Результатом этих действий является связанный массив размерностью 2N, где N – общее количество RR-интервалов в первичных данных.

На основе предположения, что RR-интервалы ни при каких обстоятельствах не могут быть меньше и/или больше определенного значения (например, 200 мс и 2000 мс), производится исключение значений RR-интервалов, не входящих в этот диапазон. При этом при откидывании RR_i интервала происходит исключение T_i времени, тогда как остальные времена остаются прежними, что позволяет избежать нежелательных смещений времени. Для определения пороговых значений RR-интервалов можно воспользоваться инструментом «Гистограмма», который позволяет определить основной диапазон изменения RR-интервала, но подобное пороговое откидывание – это нелинейная процедура, которая может привести к нежелательной деформации спектра; соответственно применяется она в крайне редких случаях:

$$rr_{\min} < rr_i < rr_{\max}.$$

На этапе основной фильтрации производится оценка изменения RR-интервала от отсчета к отсчету, деленного на время между значениями. В случае, если это изменение превышает установленное пороговое значение

$$\frac{rr_{i+1} - rr_i}{T_{i+1} - T_i} < d_{\max},$$

производится коррекция этого сильно изменившегося RR-интервала при сохранении времени данного RR-интервала. Из предположения, что основной тип ошибки, встречающийся в ритмограмме, – это пропуск R-зубца (или нескольких R-зубцов), который приводит к двукратному увеличению следующего RR-интервала, производится попытка уменьшения значения RR-интервала в 2 и в 3 раза:

$$rr_{i+1}/2; \quad rr_{i+1}/3.$$

При сохранении времени производится повторное сравнение его изменения относительно предыдущего:

$$\frac{rr_{i+1}/2 - rr_i}{T_{i+1} - T_i} < d_{\max}$$

или

$$\frac{rr_{i+1}/3 - rr_i}{T_{i+1} - T_i} < d_{\max}.$$

Если же новый измененный отсчет попадает в допустимые пределы, мы принимаем полученное делением значение как истинное. В случае, если попытки уменьшения в 2 и в 3 раза значения RR-интервала не приводят к попаданию RR-интервала в допустимые пределы изменения, используется медианная фильтрация, ранг которой выбирается. Рангом медианной фильтрации считается количество значений, которые попадают в окно фильтрации медианного фильтра.

С установленным шагом, длина которого также может быть установлена, окно вычисления

спектра проходит весь сигнал или установленный отрезок. В данной работе динамический спектр ритмограмм вычислялся с шагом в 10 с и окном вычисления спектра 100 с. Данные значения были выбраны, исходя из математических правил корректного спектрального анализа.

В результате мы получаем временную динамику мощностых характеристик спектров колебаний RR-интервалов, а именно: суммарную мощность спектра вариабельности сердечного ритма – TP ($мс^2$), мощность спектра ритмограмм в области очень низких частот – VLF ($мс^2$), мощность спектра ритмограмм в области низких частот – LF ($мс^2$), мощность спектра ритмограмм в области высоких частот – HF ($мс^2$), соотношение мощностей спектра ритмограмм в области низких и высоких частот (индекс вегетативного баланса) – LF/HF, которые отражают активность коркового, вегетативных (симпатический, парасимпатический) и гуморального контуров регуляции сердечного ритма и уровень регуляции в целом (Akselrod, 1995).

Обсуждение результатов

Индивидуальный мониторинг ВСР в контексте публичного выступления показал у 96 % испытуемых одновременное снижение общей мощности ритма (TP) и возрастание индекса вегетативного баланса – LF/HF (ИВБ). Данная динамическая структура следует за всплеском общей мощности колебаний, который возникает в момент начала выступления. По окончании данного контекста наблюдается обратная динамика – снижение ИВБ на фоне возрастания общей мощности, далее динамика этих параметров возвращается к близкому к исходному среднему уровню (рис. 1).

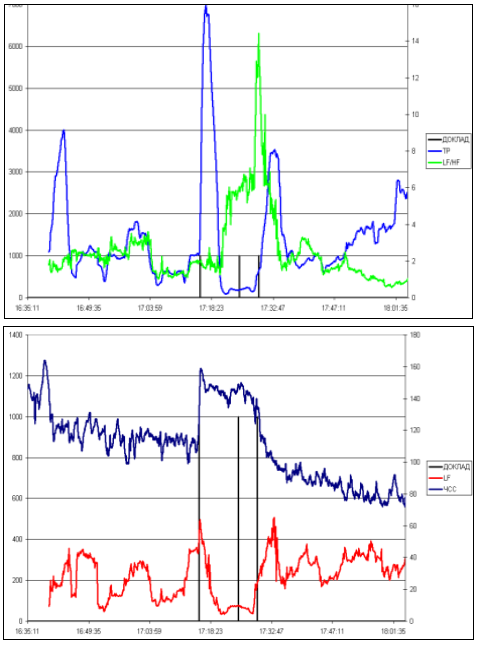


Рис. 1. Индивидуальная динамика параметров ВСР испытуемого в контексте публичного выступления

Описанная динамическая структура наблюдается на фоне возрастания ЧСС (маркер симпатической активации) и воспроизводится у спасателей при обучении в газово-дымовой камере (рис. 2), а также у испытуемых, играющих в компьютерные игры, – в ситуациях ошибочных действий (Полевая и др., 2013).

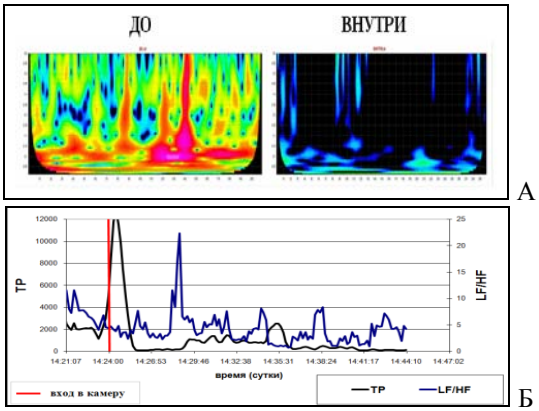


Рис. 2. Вейвлет-спектрограммы динамики RR-интервалов испытуемого в контексте до и внутри газово-дымовой камеры (А), динамика частотных характеристик ВСР (TP, LF/HF) испытуемого при входе в газово-дымовую камеру (Б)

Таким образом, по динамической структуре спектральных характеристик ВСР в стрессогенном контексте можно определить следующую вегетативную реакцию: этап активации систем регуляции (возрастание общей мощности с преобладанием мощности в низкочастотной компоненте LF), который предположительно можно связать с симпатоадреналовой активацией. Сменяет этот этап доминирование симпатической регуляции (возрастание ИВБ) на фоне резкого снижения общей мощности спектра (TP), данная динамика может объясняться включением второго компонента стресс-реакции – эндогенной опиоидной системы, которая, обладая гипобиотическими свойствами, начинает взаимосвязанную работу с симпатоадреналовой системой.

По типичной динамике общей мощности спектра TP и ИВБ у водителей общественного транспорта во время движения были идентифицированы непредсказуемые события, которые вызывают стрессовую реакцию организма. В контексте вождения автотранспорта выделено 4 группы событий, выстроенных по степени предсказуемости в процессе движения:

1. Посадка-высадка пассажиров. Моменты начала и окончания остановки в формально обозначенных пунктах маршрута автобуса. Данные события являются стандартными в маршруте – плановыми, предсказываемыми водителями.

2. Светофор. Моменты начала и окончания остановки движения с соответствии с сигналами светофора. Данные события являются внеплановыми, случайно возникающими в процессе движения. Однако предупреждающие сигналы светофора (мигание зеленого, загорание желтого сигнала) позволяют частично предсказывать необходимость остановки.

3. Пробка. Моменты начала и окончания остановки движения по причине дорожного затора. Данное событие является внеплановым в процессе

движения, нарушающим стандартную скорость прохождения маршрута, что в результате может привести к достижению конечной точки рейса с запозданием во времени.

4. Маневр. Моменты нестандартных, сложных дорожных ситуаций: неожиданной вынужденной остановки, подрезание пути со стороны других участников движения, сложные повороты и др. Данные события, являющиеся наиболее непредсказуемыми и внезапными в процессе движения, требуют мобилизации ресурсов водителя для их преодоления.

Обнаружены значимые различия в частотных параметрах ВСР, сопровождающих разные (по степени предсказуемости) события (таблица). Мощности всех компонент спектра ритмограммы (TP, VLF, LF, HF) возрастают значимо выше при наступлении непредсказуемых событий, при этом ИВБ сохранен. Эти результаты демонстрируют первый этап стресс-реакции, описанный выше.

Значение спектральных показателей ВСР
при предсказуемых и непредсказуемых событиях

Показатели	Предсказуемые события	Непредсказуемые события
TP, мс^2	649,1 (313,0)	1396,2 (459,4)*
VLF, мс^2	203,0 (117,5)	746,7 (479,2)*
LF, мс^2	137,5 (78,9)	423,7 (233,8)*
HF, мс^2	39,2 (12,8)	109,3 (38,9)*
LFn, %	75,0 (8,7)	75,6 (11,8)
HFn, %	25,0 (8,7)	24,4 (11,8)
LF/HF	3,7 (2,3)	4,3 (2,7)

Примечание: * – $p < 0{,}01$.

В динамике частотных характеристик ВСР испытуемых максимально непредсказуемое событие – маневр запускает описанную выше структуру (рис. 3). При этом важно отметить, что в ситуациях с более высоким уровнем определенности (светофор) наблюдается параллельная, положительно скоррелированная динамика TP и ИВБ – их возрастание.

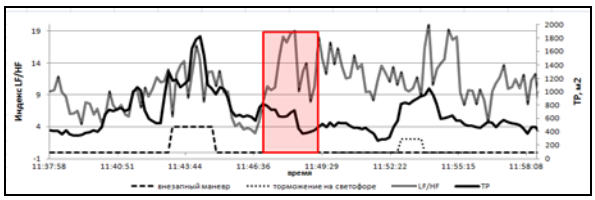


Рис. 3. Динамика частотных характеристик ВСР (TP, LF/HF) водителя

Заключение

Таким образом, стадии стресс-реакции воспроизводятся в динамических структурах частотных параметров ВСР, такие маркерные структуры неспецифичны к природе стрессогенного контекста. При этом для первой стадии характерны два, следующих друг за другом этапа: 1) возрастание общей мощности спектра ВСР (TP) с одновременным возрастанием мощности низкочастотной компоненты (LF), что соответствует резкому всплеску симпатоадреналовой активации; 2) возрастание ИВБ с одновременным резким снижением общей мощности спектра ВСР, что соответствует включению второго компонента стресс-реакции – эндогенной опиоидной системы.

Вне стрессового контекста изменения общей мощности спектра ВСР и ИВБ параллельны, положительно коррелируют.

Полученные результаты открывают перспективы решения задачи определения маркеров последовательных этапов стресс-реакции в сложных динамических структурах частотных характеристик ВСР.

Работа выполнена при поддержке гранта РГНФ № 12-36-01039.

Литература

1. *Acharya U.R., Kannathal N., Sing O.W., Ping L.Y., Chua T.* Heart rate analysis in normal subjects of various age groups // Biomed Eng Online. 2004 Jul. V. 20, № 3(1). P. 24.

2. *Akselrod S.* Components of heart rate variability // Heart rate variability. N. Y. : Armonk, 1995. P. 146–164.

3. *Borella, von E., Langbein J., Després G., Hansen S., Leterrier C., Marchant-Forde J., Marchant-Forde R., Minero M., Mohr E., Prunier A., Valance D., Veissier I.* Heart rate variability as a measure of autonomic regulation of cardiac activity for assessing stress and welfare in farm animals // Physiology & Behavior. 2007. V. 92. P. 293–316.

4. Tasak Force of Europen society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Circulation. 1996. № 93. P. 1043–1065.

5. *Анохин П.К.* Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. Принципы системной организации функций. М. : Наука, 1973. С. 5–61.

6. *Баевский Р.М.* Анализ вариабельности сердечного ритма: история и философия, теория и практика // Клиническая информатика и телемедицина. 2004. № 1(1). С. 54–64.

7. *Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В., Гаврилушкин А.П., Довгалевский П.Я., Кукушкин Ю.А., Миронова Т.Ф., Прилуцкий Д.А., Семенов Ю.Н., Федоров В.Ф., Флейшман А.Н., Медведев М.М.* Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем: (методические рекомендации) // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 65–87.

8. *Парин В.В., Космолинский Ф.П., Душков Б.А.* Космическая биология и медицина. М. : Просвещение, 1970. 220 с.

9. *Парин С.Б.* Люди и животные в экстремальных ситуациях: нейрохимические механизмы, эволюционный аспект // Вестник НГУ. 2008. Т. 2, вып. 2. С. 118–135.

10. *Парин С.Б., Чернова М.А., Полевая С.А.* Адаптивное управление сигналами о рассогласовании в когнитивных процессах: роль эндогенной опиоидной системы // Известия вузов: Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 65–73.

11. *Селье Г.* Очерки об адаптационном синдроме / пер. с англ. М. : Медгиз, 1960. 275 с.

12. *Полевая С.А., Каратушина Д.И., Шемагина О.В., Бахчина А.В., Ковальчук А.В., Парин С.Б.* Биологическая активность информационных образов в виртуальной компьютерной среде // XV Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2013» : Сб. научн. трудов. М. : НИЯУ МИФИ, 2013. Ч. 1. С. 11–20.

Разработка адаптивного базового классификатора для когнитивной системы

Н.С. Беллюстин[1], А.В. Ковальчук[2]

[1] Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород
[2] Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
nbell@awp.nnov.ru
aka.xzib1t@gmail.com

Обсуждение вопроса об искусственных когнитивных системах нередко сталкивается с неоднозначной трактовкой терминов, потому полезно вспоминать об историческом пути, приведшем к появлению естественных систем, когнитивность которых сомнений не вызывает. Появившийся в ходе 4,5 млрд. летней наземной эволюции человек относит к таким системам прежде всего себя, а также некоторых эволюционно близких земных животных, в отношении которых используются термины «знание» (gnocio) и «сознание» (cognocio). Первый термин выделяет системы, формирующие модели окружающего мира и применяющие их для планирования поведения. Второй термин акцентирует внимание на «общественном» характере знания: носители знания формируются по типовым проектам и могут передавать знания друг другу, и создают таким путем совместное знание – сознание. Первые шаги к созданию когнитивных систем начались в бульоне первичного земного океана с сортировки наполняющих его молекул: мембраны первичных безъядерных протоклеток совершенствовались на сортировке ионов натрия и калия. А миллиарды лет спустя человек решает наиболее содержательные информационные задачи на пути классификации и сортировки визуальных изображений. Беглый анализ промежуточных этапов окончательно убеждает нас, что проблема классификации объектов окружающего мира является для когнитивной системы ключевой, и классификатор объектов должен стать ключевым элементом любой когнитивной системы. Основной целью настоящего исследования является формирование базовых принципов создания таких классификаторов, которые наиболее соответствуют задаче создания искусственных когнитивных систем.

Строго говоря, количество классов, на которые классифицирующий элемент сортирует предъявляемые объекты, может быть не мало, но с ростом числа альтернатив **n** анализ качества классификатора резко усложняется из-за того, что количество типов ошибок **n(n-1)** резко увеличивается. В принципе, полиальтернативный классификатор может быть представлен совокупностью бинарных, потому здесь будем обсуждать относительно простой классификатор, задачей которого является разделение элементов на два класса. При этом постараемся учесть, что, во-первых, в переменных внешних условиях классификатор должен сочетать достаточно высокую надежность распознавания с адаптивностью к вновь поступающим данным; а во-вторых, будем полагать, что базовый классифицирующий элемент может также воздержаться от принятия решения – в этом случае предъявляемый объект будет направляться на дополнительный анализ. В связи с этим в настоящей работе подробно рассматривается вариант именно такого элементарного классификатора, который кроме выбора одной из двух альтернатив может выбрать и третий вариант.

Известно, что одним из наиболее эффективных методов классификации, который обеспечивает построение оптимальной разделяющей гиперплоскости в многомерном признаковом пространстве и позволяет получить хорошие результаты в ряде приложений [1] является машина опорных векторов (*SVM*). Однако одной из серьезных причин, ограничивающих применение метода опорных векторов в задачах непрерывной обработки потоков данных, пока является отсутствие последовательного дообучения по новым данным. Основные подходы к построению последовательных алгоритмов *SVM* изложены в работах [2, 3]. Идея последовательных алгоритмов *SVM* заключается в использовании шагов введения и выведения входных векторов во множество опорных векторов, формирующих решение. В работе [4] предложен простой и быстрый геометрический алгоритм последовательного поиска граничных векторов и формирования классифицирующей гиперплоскости.

Авторами предлагается новый вариант последовательного алгоритма *SVM*, позволяющий проводить дообучение классификатора, и показана его сходимость к решению, получаемому прямым методом. Предлагаемый алгоритм не только обеспечивает эффективное разделение пространства признаков на классы, но и дает важную количественную характеристику степени перекрытия разделяемых классов – долю обучающих примеров, попадающих в зазор между двумя гиперплоскостями. Этот параметр позволяет сравнивать между собой различные варианты наборов признаков по их эффективности в отношении разделения двух рассматриваемых классов.

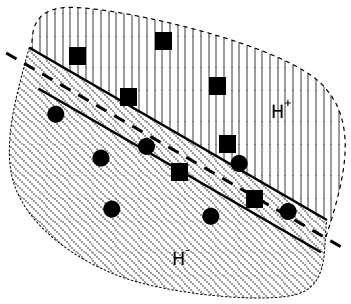
Математически задача формулируется следующим образом: имеется набор объектов обучающей выборки $S = \{x_1, ..., x_N\}$ и соответствующий им набор меток $L = \{y_1, ..., y_N\}$, где $x_i \in X$ – прецедент пространства X, в котором задано скалярное произведение, $y \in \{-1, 1\}$ – метка класса. Разделяющая гиперплоскость в пространстве X представляется выражением

$$\left\{x \in X \left| H_{(w,b)}(x) = \langle w, x \rangle - b = 0 \right.\right\},$$

где $w \in X, \|w\| = 1, b \in \Re$, а пара $(w, b) \in X \times \Re$ задает гиперплоскость в пространстве X. В этом представлении вектор w ортогонален гиперплоскости и является нормалью к ней. Формирование классификатора обеспечивается парой гиперплоскостей $H_{(w,b^+)}, H_{(w,b^-)} \in H_w$, таких что:

$$\begin{aligned} &\left(w, b^+\right): H_{w,b^+}(x_i) \geq 0, \forall i \in S^+, \\ &\left(w, b^-\right): H_{w,b^-}(x_i) < 0, \forall i \in S^-, \end{aligned} \quad (1)$$

где $S^+ = \left\{i \in Z_+ \left| y_i = 1 \right.\right\}$, $S^- = \left\{ j \in Z_+ \left| y_j = -1 \right.\right\}$ – индексы объектов разных классов. Таким образом, граница между множествами примеров разного класса может быть описана параллельными гиперплоскостями (рисунок).



Геометрическая интерпретация на плоскости классифицирующей гиперплоскости и зазора

Выбор параметров неоднозначен, и для поиска параметров гиперплоскостей с максимальным зазором может быть сформулирована следующая оптимизационная задача:

$$\max_{w,b^+,b^-} \left(b^+ - b^-\right)$$
$$s.t. \begin{cases} \langle w, x \rangle - b^+ \geq 0, \forall i : y_i = 1, \\ \langle w, x \rangle - b^- < 0, \forall i : y_i = -1, \\ \|w\|^2 = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Точное решение данной оптимизационной задачи представляет некоторую трудность, поэтому решение этой задачи ищется с помощью аппарата функций Лагранжа и двойственной задачи. Математические аспекты двойственного перехода подробно рассмотрены в работе [5]. Решение оптимизационной задачи найдено с помощью метода последовательной оптимизации. В основе метода лежит идея последовательной оптимизации целевой функции только по тем переменным, для которых возможно получение аналитического решения и которые далее всего от оптимальных. В предложенном алгоритме шаг оптимизации основан на четверках переменных, для которых удалось получить аналитическое выражение, удовлетворяющее условиям подстановки [5].

Процедура обучения классификатора сводится к следующим шагам:

- добавление нового объекта к списку опорных векторов;
- поиск для нового объекта подходящей четверки переменных, минимизирующих функционал;
- изменение переменных в соответствии с условиями подстановки.

При таком обучении классификация возможна практически на любом этапе обучения (при количестве объектов больше двух для каждого класса), что позволяет использовать алгоритм в системах активного обучения.

Апробация предложенного алгоритма проводилась на данных *MINIST* ручного начертания цифр, доступных на сайте http://ftp.ics.uci.edu/pub/machine-learning-databases/optdigits. По этим данным была сформирована задача классификации начертания каждой цифры от всех остальных цифр в наборе 0–9, данные разделялись на тренировочную и тестовую группы в соотношении 2:1. Алгоритм *OnSVM* сравнивался с известной ранее реализацией ν*-SVM* из открытой библиотеки машинного обучения *LIBSVM* 3.10 при ядровой функции гауссова типа $K_{RBF}(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2)$; использовались значения параметров $\eta = 0{,}01$, $\tau = 0{,}0001$, $\gamma = 0{,}0005$. Для сравнения пригодны два основных параметра классификатора: ошибка E_2 на тестовой базе и количество опорных векторов **nSV**. Для тернарного классификатора добавляется также параметр, описывающий его эффективность по принятым решениям R_3.

Сравнительные результаты
(усредненные и худшие по 10 цифрам)
работы алгоритма

	OnSVM				*LIBSVM*	
	nSV	E_2 (%)	E_3 (%)	R_3 (%)	**nSV**	E_2 (%)
Среднее	107	0,57	0,02	94,6	140,7	0,5
Худшее	175	1,28	0,09	90,5	230	0,95

Из таблицы следует, что на выбранной обучающей базе последовательный алгоритм получает ошибку не хуже, чем прямой алгоритм обучения в режиме бинарной классификации. Тернарная же классификация показывает в 5 раз меньшую ошибку в худшем случае и не более чем 9,5 % отказов от распознавания.

Основной особенностью семейства *SVM*-классификаторов, отличающих их от семейств формальных нейронных сетей, можно назвать необходимость хранения набора опорных векторов, по которым принимается решение. Чтобы в использовании *SVM*-классификаторов был практический смысл, количество опорных векторов должно быть много меньше размера исходной базы обучения. Разработанный алгоритм отбирает в качестве опорных объекты, лежащие на границе двух классов. Такой выбор позволяет описать границу с заранее заданной точностью и существенно снижает количество объектов, необходимых для принятия решения.

Предложенная схема классификатора обладает следующими преимуществами по сравнению с прямой реализацией алгоритма *SVM*:

- способностью к дообучению на новые данные и потоковым обучением в реальном времени;
- существенным выигрышем в качестве решения при использовании тернарной схемы принятия решения;
- управляемым параметром, регулирующим соотношение размера множества опорных векторов и обобщающие свойства классификатора.

Предлагаемый здесь тернарный элемент классификации может стать базовым элементом в иерархических системах на основе деревьев принятия решения; он может устранить их главный недостаток классификаторов – переобучение. Динамически меняющееся дерево более устойчиво к изменению и зашумлению данных, а подстройка классификатора на новые объекты будет приводить к более точному ветвлению по графу.

Литература

1. *Cristianini N., Shawe-Taylor J.* An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-Based Learning Methods. Cambridge University Press, 2000.

2. *Cauwenberghs G., Poggio T.* Incremental and decremental support vector machine learning //Advances in Neural Information Processing Systems. 2000. P. 409–415.

3. *Bordes A., Ertekin S., Weston J., Bottou L.* Fast kernel classifiers with online and active learning // J. Machine Learning Research. 2005. V. 6. P. 1579–1619.

4. *Roobaert D.* Direct SVM : A Simple Support Vector Machine Perceptron // VLSI Signal Processing. 2002. P. 147–156.

5. *Kovalchuk A.V., Bellustin N.S.* Online Learning Algorithm of Kernel Based Ternary Classifiers Using Support Vectors // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). Allerton Press, Inc., 2013. V. 22, № 3. P. 193–205.

Нелинейные взаимодействия ритмов в центральной нервной системе

А.Т. Бондарь [1], А.И. Федотчев [1], Л.В. Шубина [2]

[1]Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Московская область
[2]Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино, Московская область
a_bond@rambler.ru

Деятельность нервной системы представляет собой совокупность линейных и нелинейных взаимодействий (ЛНВ) иерархически организованных субсистем, объединенных множеством прямых и обратных связей. Изучение характера линейности или нелинейности этих взаимодействий представляет большой интерес, поскольку позволяет строить модели и гипотезы, описывающие их физиологические механизмы.

ЛНВ в нервной системе исследовались на двух экспериментальных моделях. В основе первой лежала синусоидальная фотостимуляция, вторая заключалась в формировании экспериментального эпилептического статуса (ЭС). Эти модели формально объединяет то, что фотостимуляция является процедурой, способной к провоцированию ЭС, и одной из основных диагностических процедур для выявления эпилептиформной активности. Это обстоятельство наводит на мысль, что эти модели связаны с одними и теми же общими механизмами. Наша гипотеза заключается в том, что этот механизм основан на нелинейных взаимодействиях ритмов мозга между собой, а именно на их мультипликации, а в случае с ЭС – неконтролируемой мультипликации (гипермультипликации).

Модель 1

Основным методом исследования зрительной системы является фотостимуляция частотно-модулированными стимулами. Для исследования ЛНВ чаще всего используются синусоидальные сигналы. Это обусловлено тем, что основным критерием нелинейности системы служит появление в спектре выходного сигнала новых гармонических составляющих. С этой точки зрения использование прямоугольных и фликкерных сигналов не является корректным, поскольку их спектры сами по себе содержат множество гармоник, усложняющих интерпретацию данных. Более того, такое воздействие имеет более жесткий характер, поскольку энергия ритма локализована в определенных фазах. В то же время спектр синусоидального сигнала содержит только одну компоненту, равную основной частоте, т. е. первую гармонику. Появление более высоких гармоник либо субгармоник будет однозначно свидетельствовать о нелинейности системы.

Результаты, полученные нами на модели фотостимуляции, подробно представлены на предыдущей конференции [1]. Ограничимся их кратким описанием.

В результате бинокулярной стимуляции частотой f_0 в спектрах ЭЭГ наблюдались компоненты, кратные данной частоте f_0/n, … $f_0/3$, $f_0/2$, f_0, $2f_0$, $3f_0$, … kf_0, т. е. гармоники и субгармоники. Наиболее характерным свойством образовавшихся гармонических рядов Фурье является доминирование четных гармоник. Более того, в ряде случаев нечетные гармоники почти не наблюдались. В литературе аналогичные данные представлены и для других уровней зрительной системы. Так, для ретинограммы в ответ на синусоидальную стимуляцию свойственно образование в частотном спектре как субгармоник, так и гармоник [2, 3, 4]. В ряде работ также наблюдался принцип четности [2, 3].

В другой схеме экспериментов стимуляция левого и правого глаза осуществлялась раздельно. Рисунок 1 демонстрирует типичный спектр ЭЭГ, полученный при стимуляции левого глаза частотой f_0 = 8 Гц, а правого – с частотой f_1 = 9 Гц. Хорошо видно, что реакции проявляются как на вторых гармониках (16 и 18 Гц), так и на частотах, представляющих сумму $f_0 + f_1$ (17 Гц) и разность $f_0 - f_1$ (1 Гц) частот стимуляции. 1-герцовая компонента выражена слабо, поскольку срезается фильтром низких частот.

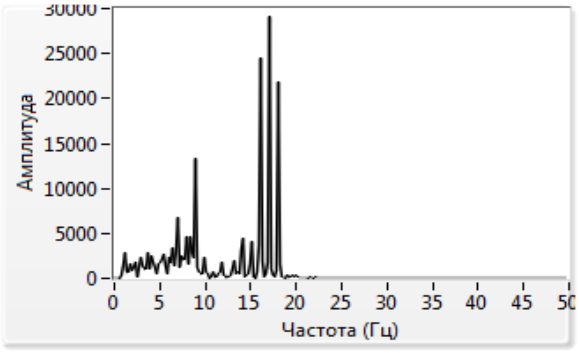


Рис. 1. Спектр ЭЭГ при раздельной стимуляции глаз частотами 8 и 9 Гц

В формальном виде наша задача заключается в определении *системного оператора* преобразования входного сигнала в зрительную систему (синусоидального светового *воздействия* $s(t)$) в сигнал на выходе системы $y(t)$ – *отклик*, или *выходную реакцию* системы, т. е. форму индуцированного сигнала ЭЭГ:

$$y(t) = T[s(t)], \qquad (1)$$

где T – *системный оператор,* т. е. правило (алгоритм) преобразования сигнала $s(t)$ в сигнал $y(t)$.

Из результатов с раздельной стимуляцией глаз разными частотами можно сделать однозначный вывод: зрительная система перемножила между собой (мультиплицировала) два разных сигнала, о чем свидетельствует наличие суммы и разности частот этих сигналов в спектре.

В случае бинокулярной моночастотной стимуляции имеет место тот же самый механизм, однако в этом случае сигнал с частотой f_0 многократно умножается сам на себя, генерируя в спектре сигнала гармоники. Количество гармоник определяется количеством операций умножения в системе (N).

$$y(t) = A_0 \cos(\omega t + \varphi)^N, \qquad (2)$$

где A_0 – амплитуда сигнала, ω – частота, φ – фаза.

Таким образом, *системным оператором* T в зрительной системе при восприятии периодических сигналов является операция мультипликации. В случае многократного повторения (итераций) он принимает характер степенной функции.

Модель 2

Экспериментальный эпилептический статус (ЭС) является удобной моделью исследования не только патологических, но и нормальных механизмов функционирования мозга. Это связано с тем, что в первые минуты и часы после его индукции в мозге еще не произошли нейродегенеративные процессы и проявления ЭС обусловлены измененным состоянием мозга, в первую очередь его гипервозбудимостью и гиперсинхронизацией, вызванной подавлением тормозных процессов.

На бодрствующих морских свинках исследовались изменения локальных полевых потенциалов (ЛПП) в межпароксизмальных и рекуррентных пароксизмальных фазах эпилептического статуса (ЭС), вызванного введением каиновой кислоты (0,4 мкг) в правый желудочек мозга. Применялся динамический спектральный анализ, позволяющий исследовать динамику ритмических компонентов частотного спектра в процессе развития ЭС.

Для фоновой электрической активности всех изучаемых структур было свойственно наличие в спектре хорошо выраженного пика на частотах 1,3–1,8 Гц, а также иногда присутствующего пика на удвоенной частоте 2,6–3,6 Гц. После введения конвульсанта уже через 1–2 минуты начинает развиваться ЭС, сопровождаемый значительными изменениями спектра ЛПП, в первую очередь появлением пароксизмов. Характер изменений спектров для пароксизмальных и межпароксизмальных участков значительно различался. Так, по мере развития статуса, в спектре межпароксизмальной активности последовательно появлялись компоненты, отражающие последовательный каскад удвоений частоты ритма, который доминировал в фоновых записях (рис. 2) При этом доминирование переходило к удвоенной частоте, регистрируемой в фоновой активности структур.

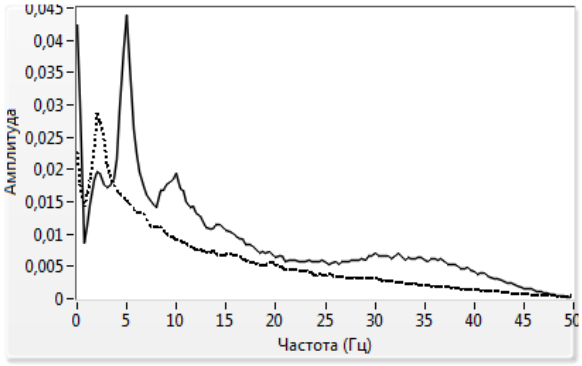


Рис. 2. Спектры ЛПП гиппокампа до введения препарата (пунктирный график) и в межпароксизмальном интервале (50–55 мин) после введения

Пароксизмальная активность развивалась по трем различным сценариям, которые, тем не менее, включали общие эпизоды с характерной формой сигнала (паттерном). Различия заключались в степени вовлечения более высокочастотных компонент.

Спектры этих паттернов представляли собой ряды Фурье с первой гармоникой, соответствовавшей одному из членов каскада удвоений в межпароксизмальном спектре (рис. 3). Анализ показал, что вторая и последующие гармоники могут отражать не появление новых ритмических процессов в системе, а, в первую очередь, изменение формы сигнала (паттерны А и С). Сигнал приобретает форму «пик – волна» и проявляется на одной из частот, свойственных межпароксизмальным спектрам. Паттерн Е (рис. 3) отличается о паттерна С преобразованием пика в высокочастотную осцилляцию (риппл) при неизменной первой гармонике. Таким образом, неодинаковый паттерн спектров во время пароксизмов и в межпароксизмальных паузах связан с различными процессами. В паузах происходило формирование новых ритмических процессов в системе (каскад удвоения частоты), в пароксизмах – изменение их формы, приводящее к образованию пикообразной активности, а при определенной степени развития процесса – к провоцированию более высокочастотных процессов.

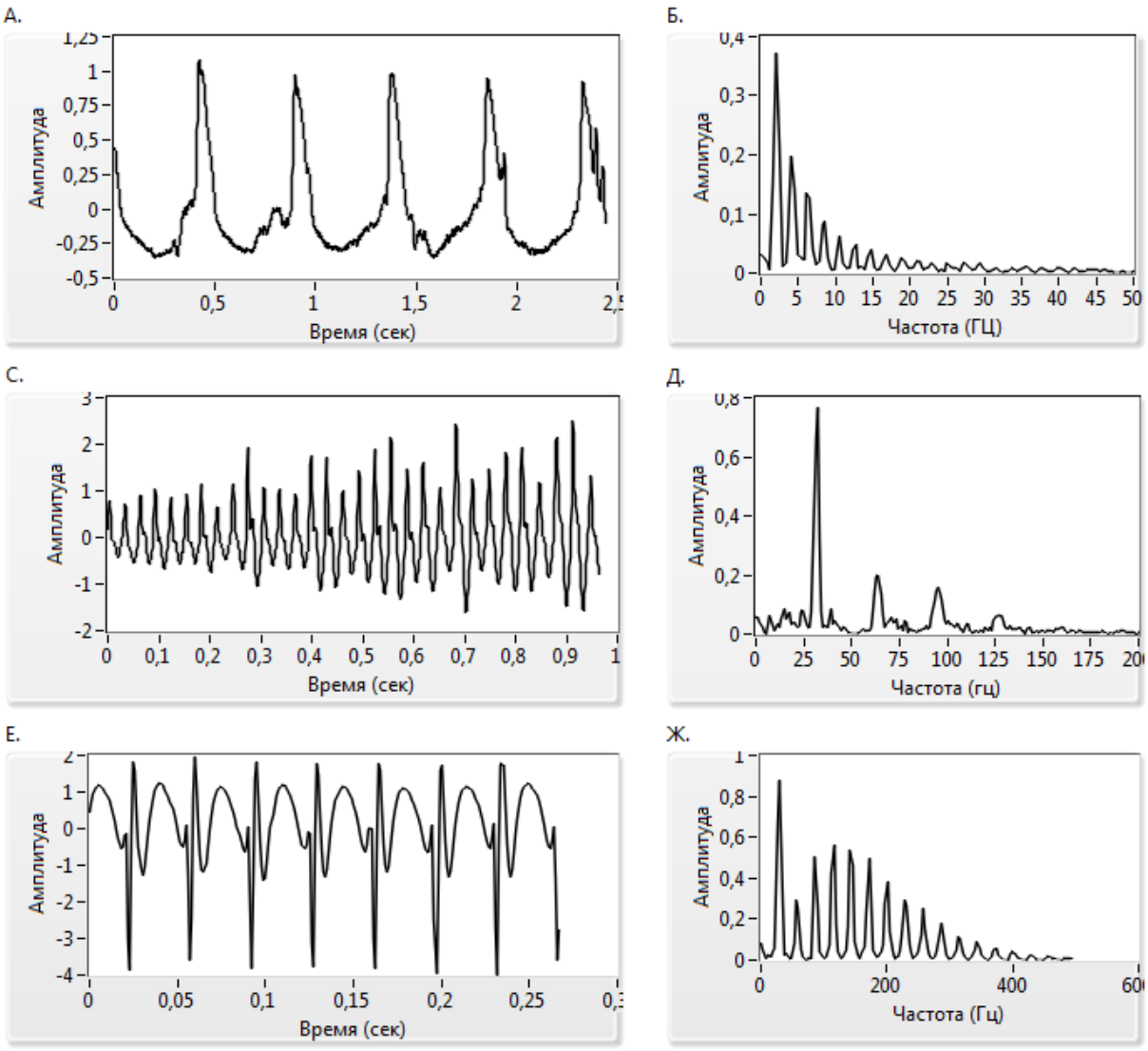


Рис. 3. Примеры паттернов ЛПП гиппокампа (А, С, Е) и их спектров (Б, Д, Ж) соответственно

Рассмотрим процессы, наблюдаемые в ЛПП при эпилептическом статусе, с точки зрения нашей гипотезы, а именно нелинейного взаимодействия ритмов изучаемых структур мозга между собой. В отличие от модели с фотостимуляцией, мы не имеем внешнего произвольного воздействия на вход системы. В то же время в системе в фоне и на всех этапах развития ЭС присутствует внутренний ритм 1,8–2 Гц, который мы можем рассматривать как входной сигнал $s(t)$. Этот сигнал подвергается множественным мультипликациям, в результате чего преобразуется в паттерн $y(t)$. В межпароксизмальных фазах происходит каскадное умножение, т. е. каждый последующий продукт умножения умножается сам на себя (возводится в квадрат), в результате чего в спектре появляются компоненты с удвоенной частотой.

В пароксизмальных фазах один и тот же ритм мультиплицируется N раз (уравнение (2)), что приводит, в зависимости от числа N, к разной степени деформации синусоидального сигнала в пикоподобный. Характерный для ЭС комплекс «пик – волна» (обозначим его как W) формируется путем линейной суммации электродом входного и выходного сигнала $W = s(t) + y(t)$.

Энергия ритма концентрируется в узкой локальной фазе периода, что приводит к образованию крутого фронта нарастания сигнала и, соответственно, образованию большого числа высокочастотных гармоник. В результате нелинейного резонанса эти гармоники могут возбуждать более высокочастотные нейронные сети, которые, в свою очередь, могут подвергнуться процессу мультипликации, и т. д. В системе образуется своеобразный «пробой» через несколько частотных диапазонов, который в силу гиперсинхронизации носит разрушительный характер и приводит к нейродегенеративным процессам.

Прямоугольные и фликкерные сигналы, используемые при фотостимуляции, также концентрируют энергию в локальных фазах периода стимуляции и, соответственно, обладают большим количеством гармоник, достигающих высокочастотных диапазонов. Благодаря нелинейному резонансу и при определенной степени синхронизации структур мозга они способны спровоцировать не-

управляемые мультипликации, приводящие к лавинообразным процессам.

Анализ результатов, полученных нами в экспериментальных моделях фотостимуляции и ЭС, позволяет предположить, что фундаментальным механизмом, т. е. системным оператором T в зрительной системе, а также ритмо- и формообразования в нервной системе в целом является мультипликация ритмов.

Мультипликации в нервной системе на нейронном уровне хорошо изучены при исследовании так называемой *gain modulation*. В сенсорных системах она выражается в том, что частота импульсации нейрона $R(x, y)$ представляет собой произведение двух факторов:

$$R(x, y) = f(x)g(y). \quad (3)$$

где $f(x)$ и $g(y)$ – параметры стимулов, характерные для соответствующей модальности [5, 6].

На основании полученных и литературных данных можно полагать, что простейшая нелинейная операция, а именно мультипликация, играет важнейшую роль в ритмообразовании и функционировании структур мозга. Это обусловливает ее ключевую роль в обеспечении и организации когнитивных функций.

Работа поддержана Российским гуманитарным научным фондом, грант № 12-06-00198, а также грантами Президента РФ НШ-850.212.4 и РФФИ № 12-04-00776-а.

Литература

1. *Бондарь А.Т.* Нелинейные реакции ЭЭГ человека в ответ на синусоидальную фотостимуляцию // Сборник трудов конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях–2011». Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2011. С. 24–26.

2. *Daniel W.* Crevier and Markus Meister, Synchronous Period-Doubling in Flicker Vision o Salamander and Man // J Neurophysiol. 1998. V.79. P. 1869–1878.

3. *Qian H., Alexander K.R., Ripps H.* Harmonic Analysis of the Cone Flicker ERG of Rabbit // Exp. Eye Res. 2010. V. 91(6). P. 811–817.

4. *Alexander K.R., Raghuram A., McAnany J.J.* Comparison of Spectral Measures of Period Doubling in the Cone Flicker Electroretinogram // Doc. Ophthalmol. 2008. V. 117(3). P. 197–203.

5. *Salinas E., Sejnowski T.J.* Gain modulation in the central nervous system : where behavior, neurophysiology, and computation meet // Neuroscientist. 2001. V. 7. P. 430–440.

6. *Pena J.L., Konishi M.* Auditory spatial receptive fields created by multiplication // Science. 200. V. 1292, № 5515. P. 249–252.

Самоорганизация пространства поиска в больших системах с нечетким выбором

Е.В. Бритвина[1], В.В. Крылов[1], Ю.А. Мальков[2]

[1] Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
[2] Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
ekbritv@meralabs.com

При рассмотрении задачи поиска в больших системах, как правило, рассматривается модель метрического пространства, элементами которого представлены все допустимые результаты поиска и все корректные запросы. При этом оказывается возможным построение эффективных аппроксимативных или нечетких алгоритмов поиска ближайших соседей и тем самым решение задач кластеризации для самообучения системы [1].

Однако нередко постановка задачи не допускает корректного введения метрического пространства, являющегося объединением множеств как ответов, так и запросов в системе. В этом случае, как правило, множества рассматриваются сепаративно и система описывается множеством пар типа (вопрос, ответ). При этом задается отношение на множестве таких пар с помощью некоторой скалярной неотрицательной функции, называемой обычно функцией релевантности [2]. Значения этой функции определяют, насколько второй элемент пары (данный ответ) соответствует первому элементу пары (запросу). В настоящей работе предлагается алгоритм поиска ответов с максимальной релевантностью для любого допустимого запроса.

Пусть задано два конечных множества:

$X = \{x_i\}_{i=1}^{N}$, имеющее семантический смысл запросов некоторой предметной области, и

$Y = \{y_j\}_{j=1}^{M}$, имеющее семантический смысл ответов на запросы в этой же предметной области.

Определено отношение X®Y, называемое отношением релевантности, такое, что каждому элементу из множества запросов соответствует подмножество так называемых релевантных ответов из множества:

$$\forall x_i \in X \Rightarrow Y_i \subseteq Y.$$

В этом случае можно ввести функцию релевантности ***rel***

$$X \times Y \to [0,1] : 0 \le rel(x_i, y_j) \le 1.$$

Эта функция аналогична используемой обычно функции «похожести» – ***similarity***, используемой в тех случаях, когда запрос и ответ рассматриваются как элементы одного и того же множества. В таких случаях можно считать это множество наделенным структурой метрического пространства или близкого к такому. Для решения задач поиска в метрических пространствах создан целый ряд мощных инструментов, основанных на различных математических свойствах таких пространств. Нашей же целью является решение задачи поиска для случая, когда множества запросов и ответов затруднительно представить элементами одного и того же метрического пространства.

Сведем задачу максимизации релевантности к задаче дискретного программирования. Иногда вместо задачи на максимум выгоднее рассматривать задачу минимизации. С этой целью будем рассматривать вместо функции релевантности связанную с ней функцию расстояния релевантности

$$d : X \to R : d(x_i, y_j) = -\ln(rel(x_i, y_j)),$$

$$d(x, y) : X \times Y \to [0, \infty).$$

Задача: найти алгоритм отыскания максимально релевантной точки

$$y_* \in Y; d(x_*, y_*) = \min_{y \in Y} d(x_*, y).$$

В изложенной постановке задача относится к классу трудноразрешимых задач дискретной оптимизации [3].

Основной идеей этого раздела является попытка свести задачу на поиск релевантного ответа из *Y* на запрос из *X* при известной функции релевантности *rel* (. , .) к нескольким задачам локального поиска на множестве *Y*. В основу метода мы положим оснащение этого множества графом со специальными свойствами, известными как MSW (MetrizedSmallWorld) для поиска локального минимума [4].

Классический подход применения метода локальной оптимизации сводится к наделению множества *Y* любой произвольной метрикой, назначением начальной точки и радиуса окрестности локального поиска. Алгоритм поиска минимума в этом случае сводится к поиску локального минимума в выбранной окрестности и перехода к новой начальной точке, в качестве которой назначается найденная на предыдущем локальном шаге точка минимума.

Как показано в [4], если на дискретном множестве существует функция расстояния, то на нем может быть построен граф, обладающий свойствами тесного мира (MSW-граф). То есть расстояние между любыми вершинами такого графа в среднем оценивается логарифмической величиной от размера графа, числа его вершин. При этом существует простой алгоритм жадного поиска, приводящий в среднем за логарифмическое число шагов к отысканию ближайших соседей для любого вновь выбранного элемента y_0 из множества (поглощающего) $\overline{Y} \supset Y$, наделенного той же функцией расстояния. Выбрав произвольно начальную точку из *Y* можно найти в *Y* ближайших

соседей для y_0; совершив логарифмически связанное с размером Y число локальных поисков.

Сведем нашу задачу поиска элемента из множества ответов Y, релевантного заданному запросу из X, к задаче поиска на MSW-графе.

Пусть задан элемент $x_* \in X$; и MSW-граф на Y. Задана также вычислимая функция расстояния релевантности между X и Y

$$d(x,y): X \times Y \to [0,\infty).$$

Задача: найти алгоритм отыскания максимально релевантной точки

$$y_* \in Y; d(x_*, y_*) = \min_{y \in Y} d(x_*, y).$$

Основная идея алгоритма может быть представлена следующим образом.

Сначала назначим случайным образом точку y_0 в Y – одну из вершин графа MSW, построенного на Y.

Найдем расстояние релевантности между этой точкой и x_*:

$$d(x_*, y_o) = d_0.$$

Рассмотрим все вершины графа, являющиеся соседями y_0, и найдем расстояния релевантности до них. Выберем ту вершину, расстояние релевантности до которой от x_* минимально. Сравним это расстояние со значением d_0. Если найденное расстояние меньше, то выбираем новую соответствующую ему вершину за новую начальную точку поиска и повторяем поиск максимально релевантной точки среди ее соседей; если нет, то выбираем точку y_0 в качестве решения задачи – возвращаем как максимально релевантную запросу x_* в данном цикле поиска. После этого выбирается другая случайная точка y_0 в Y и процесс поиска повторяется. Число случайных поисков может быть выбрано заранее или определяться адаптивно в зависимости от разброса найденных. Среди всех найденных точек локального минимума выбираются те, которые имели минимальное расстояние релевантности, и это подмножество объявляется решением. В большинстве случаев такое подмножество состоит из единственного элемента, и в этом случае найденное решение строго соответствует поставленной задаче.

В приведенном выше подходе остается неизвестным и принципиально важным вопрос о построении MSW-графа на множестве Y. Очевидно, что поскольку на этом множестве не задана функция метрики, то мы можем назначить ее произвольно. Но также очевидно, что от ее выбора будет сильно зависеть эффективность работы алгоритма. Мы предлагаем здесь выбрать в качестве функции метрики некоторую функцию внутреннего расстояния на Y, индуцированного расстоянием релевантности. Основная идея подхода состоит в том, что в множестве X некоторым образом выбирается подмножество из M «представительных» элементов, далее называемый базисом в X. Обозначим это подмножество Y.

Определим для каждой точки из Y расстояния релевантности

$$y_k \in Y, d(y_k, x_{Bi}) = d_{ki}, \forall i = I, M.$$

Назовем полученный для каждого k набор чисел координатами элемента y_i в системе координат X_B. Таким образом на множестве Y индуцируется координатная сетка размерности M. Теперь определим функцию внутреннего расстояния на Y с помощью этой координатной системы, задавая ее значения как

$$d_Y(y_i, y_j) - \sqrt{\sum_{i=j}^{M} (d_{ik} - djk)^2}.$$

Можно видеть, что такая функция удовлетворяет всем основным аксионам расстояния, поскольку дает нулевое значение для совпадающих точек в Y и положительна для несовпадающих. Мы не будем давать здесь анализ выполнения неравенства треугольника для индуцированной функции расстояния, поскольку это не является существенным для дальнейшего, однако заметим, что при правильном выборе множества X_B введенная функция растояния удовлетворит всем аксиомам метрики.

Литература

1. *Zezula P.* Similarity Search: The Metric Space Approach. New York : Springer, 2005. 220 p.

2. *Передерий В.И., Еременко А.П.* Математические модели и алгоритмы принятия релевантных решений // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы (ААЭКС). 2008. № 2(22).

3. *Ковалев М.М.* Дискретная оптимизация. Целочисленное программирование. М. : Едиториал УРСС, 2003. 192 с.

4. Single-attribute Distributed Metrized Small World Data Structure / Krylov V.V., Logvinov A.A., Ponomarenko A.A., Ponomarev D.M. // IEEE, 2009. Eigth IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science. 1–3 june 2009. Shanghai, China, 2009.

Логика работы мозга и причинность

Е.Е. Витяев

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет
vityaev@math.nsc.ru

1. Причинность

Принцип опережающего отражения действительности, сформулированный П.К. Анохиным, подразумевает причинность наблюдаемого мира. Что понимается под причинностью? Причинность является следствием *физического детерминизма*: «для всякой изолированной физической системы произвольно фиксированное состояние системы детерминируют все последующие состояния» [1]. Но возьмем, например, автомобильную аварию [2], что явилось ее причиной? Это может быть состояние поверхности дороги, ее влажность, расположение солнца относительно взоров водителей, нарушение правил дорожного движения, психологическое состояние водителей, неисправность тормозов и т. д. Понятно, что в этом случае нет определенной причины происшествия. Понятие причинности анализировал Д. Юм, но, как правильно отмечается в [3], он «не нашел никакого другого основания, кроме некоторого внутреннего чувства привычки».

В философии науки причинность сводится к предсказанию и объяснению. «Причинное отношение означает предсказуемость... в том смысле, что, если полная предыдущая ситуация будет известна, событие может быть предсказано... если будут даны все относящиеся к событию факты и законы природы» [2]. Понятно, что все факты, число которых потенциально бесконечно, и всех законов никто знать не может. Некоторые из законов могут быть обнаружены путем анализа данных. Поэтому причинность сводится к предсказанию в соответствии с индуктивно-номологическим выводом, основанном на выводе предсказаний из фактов и вероятностных законов.

При обнаружении законов (закономерностей) на реальных данных возникает проблема статистической двусмысленности, которая состоит в том, что в процессе обучения (индуктивного вывода) мы можем получать вероятностные правила, из которых выводится противоречие. Чтобы избежать противоречий, Гемпель [4] ввел требование максимальной специфичности законов, состоящее, образно говоря, в том, что закон должен учитывать максимум информации, относящейся к предсказываемому свойству.

Для обнаружения максимально специфических правил и избавления от противоречий нами разработан специальный семантический вероятностный вывод (ССВ) [5–7]. Доказано [5], что если в индуктивно-номологическом выводе делать предсказания, используя только максимально специфические законы и факты, то противоречий не возникнет. Таким образом, решается проблема статистической двусмысленности и получается формализация причинности.

Для реализации принципа опережающего отражения действительности мозг в первую очередь должен уметь обнаруживать причинные зависимости. С нашей точки зрения смысл деятельности нейронов как раз и состоит в обнаружении причинных связей. В работе [8] приведена формальная модель нейрона, реализующая правило Хебба в виде семантического вероятностного вывода, а также способная обнаруживать причинные зависимости в виде максимально специфических правил.

2. Понятие цели и теория функциональных систем

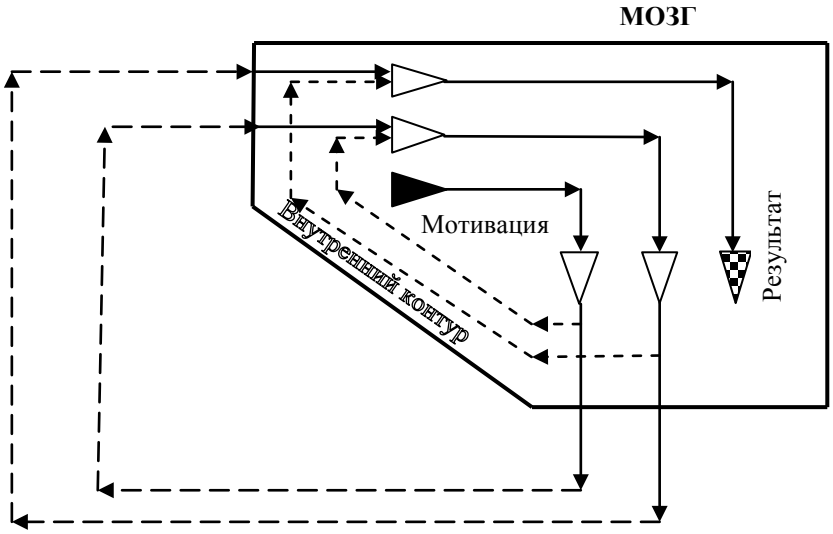
Рассмотрим целенаправленное поведение. Оно возникает, когда организмы начинают двигаться. Растения не двигаются и получают только то, что им дается. Если организм может двигаться, то он стремится изменить поступающую к нему стимуляцию, пищу и энергию нужным для него образом. Поэтому *любое действие с необходимостью становится целенаправленным* – оно стремится изменить приходящую к организму стимуляцию, что и задает цель действия. Цель нельзя достичь, не имея критерия ее достижения, иначе всегда можно считать, что цель уже достигнута и действовать не нужно. Поэтому с необходимостью должен существовать критерий достижения цели, являющийся критерием остановки действия.

Понятие цели парадоксально – цель ничего не говорит о том, *как* ее достичь и *как* организовать целенаправленное поведение. Для того чтобы знать, как достичь цели, нужен опыт. Если нет никаких знаний и опыта, то поведение организуется методом проб и ошибок. Опыт складывается из полученных методом проб и ошибок случаев достижения цели.

При целенаправленных действиях предсказания должны определять, что, как и когда можно достичь в целенаправленном поведении. Понятие цели и результата является центральным в теории функциональных систем (ТФС), где анализируется физиологический механизм цели, целеполагания и целенаправленной деятельности. Рассмотрим взаимосвязь причинности и ТФС.

Нейрофизиологическое обеспечение причинности в ТФС. Нейрофизиологически предвосхищение реализуется специальными коллатеральными ответвлениями от произведенных действий, которые поступают на «вход» мозга, конвергируя с афферентацией от входных стимулов [9, с. 97].

Фактически это означает выработку условных (причинных) связей между осуществлением дей-



Формирование акцептора результатов действия

ствий (эффекторным возбуждением) и последующим восприятием результатов действий, представленных их афферентными признаками (см. рисунок). Осуществляя действия, мы сразу же по коллатералям посылаем условный сигнал о том, что сейчас получим афферентацию о результатах этих действий. Это приводит к выработке условных (причинных) связей между действиями и их результатами, отражающих связи действий и результатов, происходящих во внешнем мире. Эти условные связи, осуществляемые мозгом по внутреннему контуру (см. рисунок), позволяют прогнозировать результаты действий, происходящих во внешнем мире, еще до появления самих результатов. Когда мотивационным возбуждением активируются различные последовательности действий по достижению поставленной цели по «внутреннему контуру», то выработанными условными связями прогнозируется и вся последовательность и иерархия результатов, которые могут быть получены в процессе достижения цели. Когда принято решение об определенном плане действий, то одновременно по «внутреннему контуру» предвосхищается достижение всех промежуточных результатов, которые составляют акцептор результатов действия. Можно показать, что эти причинные связи лежат в основе модели функциональных систем [10].

3. Принцип сензорных коррекций Н.А. Бернштейна

В работе [11, с. 25–26] Н.А. Бернштейн пишет о том, что при большом числе степеней свободы практически невозможно рассчитать движение сложной кинематической системы, например, руки: «…при многих степенях свободы у системы суммируются… погрешности, приносимые каждой из степеней свободы; при большом количестве последних суммарная ошибка сможет вырасти до такой величины, которая покроет все преимущества, в принципе создаваемые богатым разнообразием подвижности сложной цепи. Например, если каждая из степеней свободы руки и пальца пианиста, сидящего за инструментом, даст погрешность всего в 1°, то, суммируясь, эти погрешности смогут дать отклонение кончика пальца на 5–6 см (хотя по отдельным звеньям, например, пальцевых фаланг, составляющие погрешности не превысят при этом 0,05 см), т. е. вызовут промахивание на терцию или кварту… Еще более существенное значение имеют осложнения динамические. В сложной кинематической цепи, каждое звено которой обладает известной тяжелой и инертной массой, всякая сила, возникающая в одном из звеньев, тотчас же вызывает целую систему реактивных или отраженных сил, передающихся на все остальные звенья. Это взаимное влияние звеньев цепи друг на друга во всех мыслимых сочетаниях создает в общей совокупности огромное количество силовых взаимодействий, совершенно необозримое математически и представляющее непреодолимые трудности для аналитического решения. Эти реактивные силы наслаиваются на те силы, которые находятся в распоряжении организма для управления движениями системы, и на внешние силы, подвластные ему всегда лишь в большей или меньшей степени, и делают общую динамическую картину движения цепи чрезвычайно осложненной, а главное – практически непредсказуемой из-за их крайней механической запутанности».

Как мозг справляется с этой проблемой? «Решение вопроса о неоднозначности лежит в использовании для регулирования эффекторного процесса сензорных сигналов о позе кинематической цепи и о мере растяжения каждой из влияющих на ее движения мышц. …Действительно, как только орган, находящийся под действием внешних и реактивных сил, плюс еще какая-то добавка внутренних мышечных сил отклонится в своем результирующем движении от того, что входит в

намерения центральной нервной системы, эта последняя получит исчерпывающую сигнализацию об этом отклонении, достаточную для того, чтобы внести в эффекторный процесс соответственные адекватные поправки. Весь изложенный принцип координирования заслуживает поэтому названия *принципа сензорных коррекций*» [11, с. 34].

Из принципа сензорных коррекций с необходимостью следует важный вывод: планировать определенную последовательность действий заранее невозможно, планировать и предсказывать можно только последовательность достигаемых результатов, а выбор того или иного действия должен осуществляться в реальном режиме времени по принципу сензорных коррекций на основании поступающей обратной афферентации от уже осуществленных действий. Поэтому конкретный план действий должен фиксировать только последовательность и иерархию результатов, которые надо получить для достижения конечной цели.

В работах [10, 12–13], продолжая проект «мозг анимата», разработана формальная модель упомянутых информационных процессов и проведены эксперименты, подтверждающие ее эффективность. Эта модель следующим образом учитывает сказанное:

1) использует формальную модель нейрона, обнаруживающую причинные связи и основанную на семантическом вероятностном выводе;

2) осуществляет постановку цели в целенаправленном поведении, формирует функциональную систему и акцептор результатов действия;

3) автоматически формирует подцели и подкрепляет достижение подцелей, если их достижение увеличивает вероятность достижения конечной цели;

4) моделирует рефлекторное кольцо и сензорные коррекции;

5) выбирает действие в реальном режиме времени с учетом текущей ситуации и получаемой афферентации;

6) сравнивает различные способы достижения цели;

7) принимает решение об определенном способе достижения цели и всех подцелей в соответствии с последовательностью и иерархией функциональных систем.

Эта работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 11-07-00560-а), интеграционными проектами СО РАН № 3, 87, 136 и программой президента Российской Федерации поддержки научных школ НШ-276.2012.1.

Литература

1. Закон. Необходимость. Вероятность. М. : Прогресс» 1967. С. 366.

2. *Карнап Р.* Философские основания физики. М. : Прогресс, 1971. С. 388.

3. *Редько В.Г.* Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики. М. : ЛИБРОКОМ, 2011. С. 220.

4. *Hempel C.G.* Maximal Specificity and Lawlikeness in Probabilistic Explanation // Philosophy of Science. 1968. V. 35. P. 16–33.

5. *Vityaev E.E.* The logic of prediction // Mathematical Logic in Asia 2005 : Proceedings of the 9th Asian Logic Conference / eds. Goncharov S.S., Downey R. and Ono. H. Novosibirsk : World Scientific, 2006. P. 263–276.

6. *Смердов С.О., Витяев Е.Е.* Синтез логики, вероятности и обучения: формализация предсказания // Сибирские электронные математические известия. Т. 6. Новосибирск : Ин-т математики им. С.Л. Соболева СО РАН, 2009. С. 340–365.

7. *Витяев Е.Е.* Извлечение знаний из данных. Компьютерное познание. Модели когнитивных процессов. Новосибирск : Новосибир. гос. ун-т.; 2006. 293 с.

8. *Витяев Е.Е., Перловский Л.И., Ковалерчук Б.Я., Сперанский С.О.* Вероятностная динамическая логика мышления // Нейроинформатика. 2011. Т. 5, № 1. С. 1–20.

9. *Судаков К.В.* Общая теория функциональных систем М. : Медицина, 1984. С. 222.

10. *Витяев Е.Е.* Принципы работы мозга, содержащиеся в теории функциональных систем П.К. Анохина и теории эмоций П.В. Симонова // Нейроинформатика. 2008. Т. 3, № 1. С. 25–78.

11. *Бернштейн Н.А.* Биомеханика и физиология движений. // Избранные психологические труды / Н.А. Бернштейн. Москва; Воронеж, 1997. С. 605.

12. *Демин А.В., Витяев Е.Е.* Логическая модель адаптивной системы управления // Нейроинформатика. 2008. Т. 3, № 1. С. 79–107.

13. *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.

14. *Анохин К.В., Бурцев М.С., Зарайская И.Ю., Лукашев А.О., Редько В.Г.* Проект «Мозг анимата»: разработка модели адаптивного поведения на основе теории функциональных систем // Восьмая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием : труды конференции. М. : Физматлит, 2002. Т. 2. С. 781–789.

Принципы формализованного описания тепловизионных отображений: от уникального опыта к интеграции знаний

М.Г. Воловик[1], С.А. Полевая[2], А.В. Ковальчук[3]

[1]Нижегородский НИИ травматологии и ортопедии Минздрава России
[2]Нижегородская государственная медицинская академия
[3]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
afanassy@mail.ru

Отдайте человеку человеческое,
а вычислительной машине – машинное.
Н. Винер

Введение

Благодаря профессиональному опыту врач-диагност демонстрирует уникальную оперативность и точность распознавания болезни по косвенным нечетким отображениям. Такая диагностика основана на персонифицированной прецедентной базе, профессиональной эрудиции и интуитивном «знании» конкретного эксперта. Возможности экспертной диагностики закрыты для коллективного осознания и коллективной памяти. Мощным ресурсом для воспроизведения и развития медицинской когнитивной системы является создание единого универсального языка на основе формализованных описаний инструментальных отображений и динамического моделирования алгоритмов принятия диагностических решений. Наша работа посвящена анализу принципов перехода от уникального опыта к интеграции знаний в сфере тепловизионной (ТВ) диагностики.

Тепловидение (термография) позволяет наблюдать и регистрировать пространственно-временную динамику поля радиояркостных температур на поверхности объектов. Диагностические решения принимаются на основе визуального анализа изображений, отображающих температурную карту кожи в псевдохроматическом коде. Глубина «прозрачности» биотканей для ИК-лучей в окнах прозрачности атмосферы 3–5 и 8–14 мкм составляет около 100 мкм, поэтому можно говорить о регистрации информации, лишь косвенно отражающей функциональное состояние глубже расположенных источников излучения и кожную микроциркуляцию. Интерпретация этих данных требует:

– знания механизмов термогенеза и теплопередачи в тканях организма;

– понимания этиологии и патогенеза, а также саногенеза заболеваний, проявляющих себя в виде локальных температурных отклонений от нормы;

– применения таких методов обработки данных, которые позволяли бы формализовать ТВ-информацию, сделав ее языком, доступным как клиницистам, так и исследователям смежных с медициной специальностей (физиологам, биофизикам, разработчикам диагностической аппаратуры и т. п.).

В связи с этим актуально решение следующих проблем [1]:

1. Выделить надежные информативные признаки, по которым возможно обнаружить патологию и классифицировать ее тип, очертить ее границы.

2. Синтезировать адаптивные критерии и решающие правила для обнаружения и классификации типа патологии.

3. Разработать алгоритмы оперативного автоматизированного анализа ИК-термокарт с функцией обнаружения и классификации типа патологии и очерчивания ее границ.

Широкий спектр клинических и субклинических нарушений в различных органах и системах организма, меняющих характеристики ИК-излучения от них, диктует необходимость выработки ТВ-критериев, понятных специалистам-медикам различного профиля и помогающих им эффективно решать диагностические задачи. В то же время, как пишет Г.Р. Иваницкий, «у врачей еще нет в полной мере понимания, что могут дать медицине тепловизоры третьего и последующих поколений, а также в чем состоит специфика информации, получаемой с помощью тепловидения» [2].

1. Формализованное описание первичных термокарт

Идентификация состояния физиологической системы по первичной термокарте в настоящее время реализуется опытным экспертом на основе субъективной базы прецедентов. Применение стандартных методов статистической обработки может давать значимые результаты в формализации и трансляции уникальных экспертных знаний. Дисперсионный анализ данных в программных средах Statistica-6 и Excel позволяет использовать паттерн температур для выделения диагностических признаков, оценки значимости физиологических и клинических факторов, поиска оптимальных стратегий воздействия по отношению к широкому спектру заболеваний (рис. 1).

Статистический анализ может стать основой для принятия диагностических решений по отношению к грубым нарушениям кровотока при специальном ТВ-обследовании в стационарных контекстах.

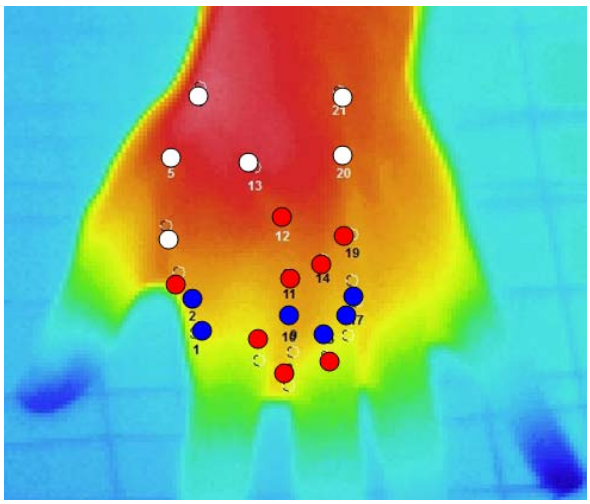


Рис. 1. Зоны динамических измерений температуры по ходу тыльных вен кисти. Выделены кластеры со сходной температурной динамикой после 10-минутной артериальной окклюзии II пальца: I – зоны 3, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 15 (красный цвет); II – 1, 2, 10, 16, 17, 18 (синий цвет); III – 4, 5, 6, 13, 20, 21 (белый цвет)

2. Реконструкция динамики физиологической системы по ТВ-данным

Для ТВ-контроля за изменениями физиологической системы в сложных неоднородных контекстах возникает необходимость в применении инструментария нелинейной динамики. Как пример можно привести ИК-термокартирование открытой коры головного мозга в ходе нейрохирургических операций, которое доказало высокую информативность и достоверность метода в оценке функционального состояния локального мозгового кровотока [3], особенно тех областей коры, которые граничат с опухолью.

Рис. 2. Блок-схема системы «мозг – патология». $T^{CT}_{i,j,t}$ – входное воздействие $T^{CB}_{i,j,t}$ – выходная реакция (пространственно-временные распределения температур «холодовой пробы» и открытой коры головного мозга соответственно). Помехи – случайные флуктуации параметров, ошибки измерения и неучтенные факторы

Ранее [1] для решения этой задачи была разработана кибернетическая парадигма, адаптированная к ауторегуляторным особенностям головного мозга человека, условно изображенная на рис. 2. При синтезе структурно-функциональной схемы системы «мозг – патология – кровоток», приведенной на рисунке, и моделей на ее основе использовались положения синергетики, кибернетики и современной теории автоматического управления. Изучение системы и построение ее феноменологической модели проводилось с позиций выделенного входного воздействия – «холодовой пробы».

Результатом работы стал синтез архитектуры алгоритмической составляющей системы интраоперационной нейронавигации по изображению открытой коры головного мозга. Примененные алгоритмы позволяют не только обнаруживать патологию и очерчивать ее границы, но также и дифференцировать степень нарушений локального мозгового кровотока открытого сегмента коры.

3. Перспективы развития систем поддержки принятия решения в тепловидении

Задачи формирования экспертных систем поддержки принятия решения для врачей-диагностов остаются одними из необходимых и представляют собой бурно развивающуюся область обработки и анализа данных [4]. В общем случае целью использования таких систем является представление потоковых данных, непрерывно или дискретно поступающих от пациента в виде, наиболее удобном (минимизация временных затрат при минимальном количестве ошибок) для установления диагноза, оценки эффективности лечения, анализа динамики заболевания и т. д. Следует учесть, что экспертная система – система формальная, структурированная и формируется на основе формальных признаков в измеряемых данных, описывающих нужный симптом. Поэтому можно выделить два основных процесса при разработке таких систем:

– процесс обучения (анализ симптомов и поиск признаков, являющихся маркерами симптомов);

– процесс распознавания (детектирование симптомов по признакам, визуализация).

В большинстве экспертных систем процесс обучения выполняется с помощью опытного диагноста, на основании рекомендаций которого разработчиком формируется алгоритм поиска признаков (например, ЭКГ-диагностика). В последнее время появляется все больше задач, в которых формализация признаков выглядит слишком трудоемкой задачей в силу высокой вариабельности исследуемого сигнала. В таких случаях используют методы машинного обучения, нейронные сети, среди которых стоит выделить хорошо зарекомендовавшие себя на высоковариабельных сигналах сети глубокого обучения [5]. Использование автоматического и полуавтоматического обучения во многих случаях позволяет сократить ошибку идентификации симптомов [6, 7].

Процесс распознавания и представления симптомов в большей степени зависит от способа обучения системы и сводится к детектированию ранее изученных признаков на пространственно-временных данных и к последующему принятию решения. Отметим, что в общем случае распозна-

вание не является однократным актом, а представляет собой временной процесс измерения в разных модальностях (например, сигнала с разных датчиков).

Заключение

Во всем мире растет число публикаций, рассматривающих проблему информатизации медицины. Уже заголовки работ показывают неоднозначность и сложность вопроса: «Утраченное искусство врачевания» [8], «Является ли клиническое суждение утерянным искусством в эпоху высоких технологий?» [9] и т. п.

Согласно Ф. Бэкону, есть три пути познания: 1) «путь паука» – попытка выяснить истину «чистым сознанием» с полным пренебрежением фактами и реальностью (метод догматиков и рационалистов); 2) «путь муравья» – использование только набора фактов без их обобщения (эмпиризм); 3) «путь пчелы», сочетающий достоинства обоих методов. «Человек скорее верит в истинность того, что предпочитает» (Ф. Бэкон).

По мнению Л.Б. Лихтермана, с появлением методов визуализации «клиническое мышление получило настоящую обратную связь» [10]. Однако добытые с помощью инструментальных методов данные являются лишь сырьем для реконструкции образа функционального состояния и идентификации болезни. Проблема развития медицинской когнитивной системы «…сводится не к замене клинического мышления инструментальными находками, а к освобождению врача для оперирования этими находками в интересах больного» [10].

Литература

1. *Макаренко А.В., Правдивцев А.В., Воловик М.Г.* К вопросу о моделировании и анализе ИК-термокарт головного мозга человека // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 145–155.

2. *Иваницкий Г.Р.* Тепловидение в медицине // Вестник РАН. 2006. Т. 76, № 1. С. 48–62.

3. *Gorbach A.M., Heiss J.D., Kopylev L., Oldfield E.H.* Intraoperative infrared imaging of brain tumors // J. Neurosurg. 2004. V. 101, № 6. P. 960–969.

4. *Bengio Y.* Learning Deep Architectures for AI // Foundations and Trends in Machine Learning. 2009. V. 2, № 1. P. 1–127.

5. *Wretman D.* Finding Regions of Interest in a Decision Support System for Analysis of Infrared Images. Master of Science Thesis. Stockholm, Sweden, 2006.

6. *Devashri R., Kulkarni P.S.* Application of intelligent computing techniques for the interpretation and analysis of biological and medical data for various disease diagnosis: review // Int. J. Advanced Computer Research. 2012. 2 (4, Issue 6). P. 446–451.

7. *Gerasimova E., Plekhov O., Bayandin Yu., Naimark O., Freynd G.* Identification of breast cancer using analysis of thermal signals by nonlinear dynamics methods // 11th Int. Conf. on Quantitative InfraRed Thermography. Naples. June 11–14. 2012. P. 190.

8. *Lown B.* The lost art of healing. N.Y., 1996.

9. *Kessler L.A.* In a high thech age, is a clinical judgment a lost art form? // Surg. Neurology. 1999. V. 52, № 1. P. 22–23.

10. *Лихтерман Л.Б.* Клиническое мышление в нейрохирургии // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. 2001. V. 1. P. 23–26.

Моделирование управления нейросетями мозга произвольными движениями человека – теппингом

Т.В. Гавриленко

Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, Сургут
karmacurator@mail.ru

Одно из основных направлений в науке и технике – это поиск формальных моделей, закономерностей и алгоритмов, описывающих сложные объекты, системы, процессы – complexity. Большинство современных научных исследований посвящено вопросам формализации в описании complexity. Несомненно, результаты таких исследований крайне востребованы и практически значимы для любого направления научных знаний человека и позволяют переходить на более высокий уровень понимания сложных систем.

При исследовании относительно простых предметных областей (технических систем) процедура получения формальных описаний предметной области хорошо отработана и известна, так как описывается в рамках детерминистского или стохастического подхода, при этом получаемые результаты хорошо согласуются с наблюдаемыми значениями вектора состояния системы на реальных объектах. Изучение сложных систем, объектов и процессов сопряжено с дополнительными усилиями и в ряде случаев требует нетривиальных, особых решений.

С развитием вычислительной техники и появлением эффективного математического и моделирующего программного обеспечения (ПО) появилась возможность исследовать сложные объекты, процессы, явления и использовать для практических целей сложные формальные модели и алгоритмы их реализации. Они повышают эффективность и достаточно простых методов обработки данных медико-биологических исследований.

Биологические системы, и в частности организм человека, остаются наиболее сложными системами (сложными биологическими динамическими системами (БДС)) с точки зрения как описания, так и применения их описаний для практических целей [1], например описание функциональных систем организма (ФСО). Наибольшую сложность представляет исследование и оценка состояния организма человека по таким измерениям, как электроэнцефалограмма, электрокардиограмма, треморограмма, т. е. измерения вектора состояния человека на некотором промежутке времени Δt. Сейчас моделей, адекватно описывающих подобные процессы, крайне мало. Одной из причин, по которым крайне сложно создавать модели поведения вектора состояния человека, является невоспроизводимость результатов экспериментов (невозможно получить идентичные значения вектора состояния человека даже при одинаковых условиях эксперимента) [4–6]. Каждый раз регистрируемые показатели (сигналы) уникальны и невоспроизводимы [7].

Для решения задачи моделирования таких медико-биологических показателей, как электроэнцефалограмма, электрокардиограмма, ритмограмма, треморограмма, была взята двухкластерная трехкомпартментная модель системы управления (рис. 1) [2]. Для сравнения формируемого выходного сигнала $y = y(t)$ применялись методы теории хаоса-самоорганизации [3, 8].

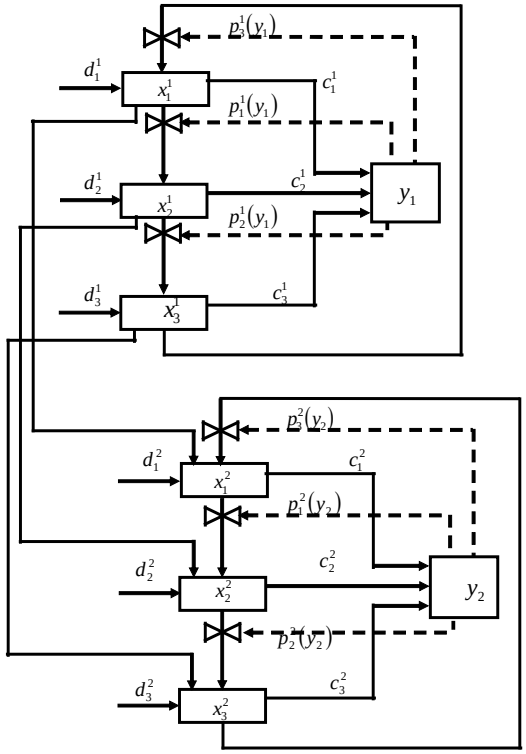


Рис. 1. Граф двухкластерной трехкомпартментной системы управления

Система уравнений [1], описывающая данную модель, имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_{11}(y_1)x_1 - bx_1 + u_1 d_1, \\ \dot{x}_2 &= A_{21}x_1 + A_{22}(y_2)x_2 - bx_2 + u_2 d_2; \\ y_1 &= c_{11}^T x_1, \\ y_2 &= c_{21}^T x_1 + c_{22}^T x_2. \end{aligned} \qquad (1)$$

Данная модель была изучена с помощью пакета прикладных программ, реализующих имитационное моделирование поведения модели (1) при различных начальных состояниях и различных уровнях управляющего воздействия *ud*. Модель позволяет увидеть результаты работы каждого кластера и варьировать уровень управляющего воздействия для определения бифуркационных параметров. На выходе *y* имитационной модели

при различных внешних воздействиях мы получаем сигналы, которые по своему характеру и параметрам согласуются с результатами обработки и оценки реальных сигналов. На рис. 2 приведен пример выходного сигнала. Для сравнения на рис. 3 приведен пример реального сигнала.

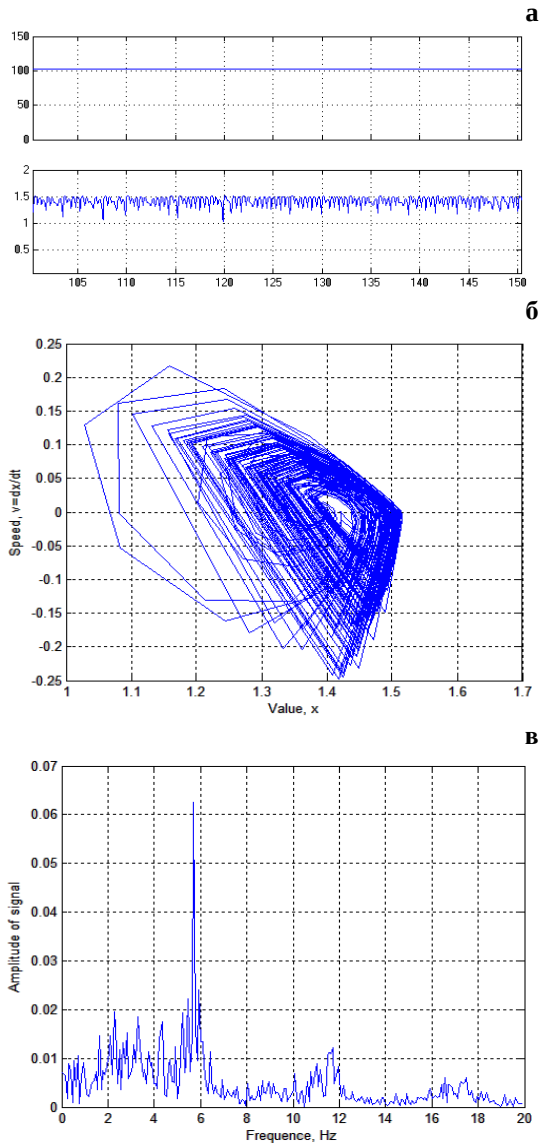


Рис. 2. Пример модельного сигнала и его обработки: *а* – модельный сигнал с выходов первого и второго кластера; *б* – фазовая плоскость сигнала в координатах x и dx/dt; *в* – амплитудно-частотная характеристика сигнала с выхода второго кластера

Получаемый в результате моделирования сигнал при различных *ud* (управляющих воздействиях) обладает различными свойствами. Фактически уровень управляющего сигнала *ud* и, как следствие, выходной сигнал *y* можно условно разделить на 4 вида, по мере роста значения *ud*. Конечные значения выходного сигнала *y* и *ud* зависят от конкретной настройки модели, но моделируемый сигнал на выходе может быть разделен на 4 вида:

– *хаотический сигнал.* Сигнал на всем моделируемом интервале времени изменяется в широких пределах, отсутствует выраженная повторяемость (обнаружить равнозначные сигналы в заданных пределах (от 100 значений на выходе) не удалось), АЧХ сигнала имеет сложную структуру и варьируется на всем моделируемом промежутке времени;

– *квазипериодический сигнал.* В сигнале присутствуют периодические процессы, которые можно наблюдать визуально, но АЧХ имеет сложную структуру (пример такого сигнала на рис. 2);

– *периодический сигнал.* Сигнал характеризуется строгим периодическим процессом, в АЧХ выражены 3–4 частоты (без промежуточных значений);

– *вырожденный сигнал.* Сигнал вырождается в прямую линию, колебательных процессов не наблюдается.

Данное разделение имеет прямые аналогии с любыми сложными биологическими динамическими системами.

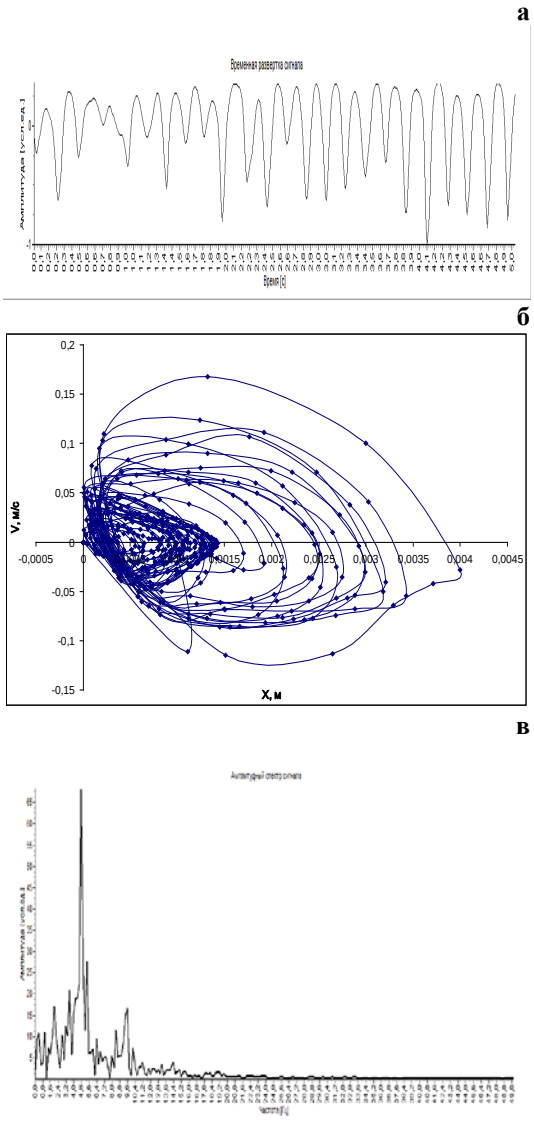


Рис. 3. Пример экспериментального сигнала произвольных движений человека (теппинг) и его обработки: *а* – исходный сигнал; *б* – фазовая плоскость сигнала в координатах x и dx/dt; *в* – амплитудно-частотная характеристика сигнала

Результаты имитационного моделирования позволяют говорить о высокой согласованности

полученных результатов с реальными сигналами, зарегистрированными у испытуемых в разных условиях. Для различных показателей ФСО человека параметры модели и *ud* выбираются индивидуально.

Литература

1. *Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е* Особенности измерений и моделирования биосистем в фазовых пространствах состояний // Измерительная техника. 2010. № 12. С. 53-57.

2. *Еськов В.М.* Введение в компартментную теорию респираторных нейронных сетей. М. : Наука, 1994. 160 с.

3. *Gavrilenko T.V., Baltikova A.A., Degtyarev D.A., Pashnin A.S.* The comparison of the efficiency of classic stochastic theory and theory of chaos-selforganization (TCS) // Complexity. Mind. Postnonclassic. 2012. № 1. P. 81–90.

4. *Eskov V.M.* The third global paradigm: http://www.thirdglobalparadigm.com/home/manifesto.

5. *Eskov V.M., Eskov V.V., Filatova O.E.* Characteristic features of measurements and modeling for biosystems in phase spaces of states // Measurement Techniques (Medical and Biological Measurements). 2011. V. 53, № 12. P. 1404–1410.

6. *Eskov V.M., Gavrilenko T.V., Kozlova V.V., Filatov M.A.* Measurement of the dynamic parameters of microchaos in the behavior of living biosystems // Measurement techniques. 2012. V. 55, № 9. P. 1096–1101.

7. *Eskov V.M., Eskov V.V., Filatova O.E., Filatov M.A.* Two types of systems and three types of paradigms in systems philosophy and system science // J. Biomedical Science and Engineering. 2012. V. 5, № 10. P. 602–607.

8. *Filatov M.A., Filatova D.Y., Himikova O.I., Romanova J.V.* Matrixes of quasiattractor distances at identification of human psychophysiology function // Complexity. Mind. Postnonclassic. 2012. № 1. P. 19–24.

Информационный подход к описанию звукового сигнала

В.Е. Гай

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
iamuser@inbox.ru

Задача оценки частоты голоса является одной из основных задач цифровой обработки речевых сигналов. Результаты ее решения используются при распознавании и сжатии речи, идентификации, верификации диктора и т. д. Также алгоритмы вычисления частоты основного тона нашли свое применение при настройке музыкальных инструментов, создании нотной записи и классификации музыкальных произведений.

Разработанный алгоритм оценки частоты основного тона основан на теории активного восприятия (ТАВ), предложенной профессором В.А. Утробиным [1]. В рамках теории звуковой сигнал рассматривается как системное образование. Для обнаружения системных элементов используется интегральное преобразование, а для выявления связей между элементами – пространственное дифференцирование [2]. Результатом выявления дифференциальной структуры является спектральное описание сигнала.

Теория активного восприятия не ограничивается только формированием спектрального представления сигнала. В ТАВ входит раздел «Алгебра групп», посвященный анализу зависимостей между спектральными коэффициентами разложения. Обнаруженные зависимости допускают свое использование на этапах принятия решения и понимания анализируемого звукового сигнала [1]. Базовым преобразованием ТАВ является *U*-преобразование.

1. *U*-преобразование

Пусть $f(t)$ – анализируемый звуковой сигнал, наблюдаемый на конечном отрезке времени. Результат применения *U*-преобразования к сигналу f – многоуровневое (грубо-точное) спектральное представление $D = \{d_{ij}\}$, $i = \overline{1,K}$, $j \in \overline{1,M_i}$, где K – число уровней разложения, M_i – количество сегментов сигнала на i-м уровне разложения, d_{ij} – спектр, включающий L спектральных коэффициентов (число используемых фильтров), $d_{ij}\{k\}$ – k-й спектральный коэффициент ($k = \overline{1,L}$), f_{ij} – сегмент сигнала f, по которому вычислен спектр d_{ij}.

2. Алгебра групп

Примем для множества фильтров $\{F_i\}$, что $+1 \to 1$ и $-1 \to 0$. Получим множество бинарных операторов $\{V_i\}$. Для этих операторов допустимы теоретико-множественные операции объединения (сложения) и пересечения (умножения). Результатом имеем алгебру $A_V = <\{V_i\}: +, \times >$ [1].

В алгебре A_V существуют алгебраические группы:

1) P_{ni} – группы на трех элементах (названы полными), образованы на тройках операторов (V_i,V_j,V_k), для которых справедливы соотношения: $V_i + V_j + V_k \equiv e_1$ – единица; $V_iV_jV_k$ – образ, формируемый с помощью операции умножения (число инверсий операторов должно быть четно), и описание группы P_{ni}. Число возможных образов полных групп, с учетом инверсий операторов, равно четырем.

2) P_{si} – группы на четырех элементах (названы замкнутыми), образованы на четверке операторов (V_i,V_j,V_n,V_m), где $(V_i,V_j,V_k) \in P_{ni}$, $(V_n,V_m,V_k) \in P_{nj}$, с описанием $V_iV_j + V_n\overline{V}_m$ (где необходимое число инверсий операторов нечетно) и единицей: $V_i + V_j + V_n + \overline{V}_m \equiv e_1$. Число возможных образов замкнутых групп, с учетом инверсий операторов, равно восьми.

Множества $\{P_{ni}\}$, $\{P_{si}\}$ конечны и имеют мощность 35 и 105 соответственно (данные множества строятся на 16 операторах). Множества $\{V_i\}$, $\{P_{ni}\}$, $\{P_{si}\}$ – множества эталонов, используемые при решении задачи узнавания объекта исследования в пространстве эталонов. Обозначение полной группы на операции сложения – P_{nia}, на операции умножения – P_{nim}.

Алгебра групп используется для формирования описания звукового сигнала. С помощью замкнутых и полных групп выполняется спектрально-корреляционный анализ. Полные группы позволяют выявить корреляционные связи между операторами. Замкнутые группы позволяют выявить корреляционные связи между полными группами. Проводя аналогию между алгеброй групп и языком, можно ввести следующие соответствия: оператор – алфавит языка, полная группа – слово, замкнутая группа – словосочетание.

3. Оценка частоты основного тона

Рассмотрим алгоритм оценки частоты основного тона:

1) построение на основе *U*-преобразования спектрального представления D сигнала f;

2) формирование огрубленного представления $C = \{c_{ij}\}$ спектрального представления D (степень огрубления – параметр k); огрубление спектрального представления используется для создания единообразного описания каждого спектра;

3) выбор ключевых сегментов сигнала f; анализируется каждый спектр c_{ij} огрубленного разложения. Если $\forall\ t \in [1; L]$ верно, что $|c_{ij}(t)| \le k$ или $|c_{ij}(t)| \ge 1$ ($k < 1$), то сегмент сигнала f_{ij}, по которому вычислен спектр d_{ij}, считается ключевым и будет использоваться в дальнейших вычислениях:

$$K_f = K_f \cup f_{ij},$$

где K_f – набор ключевых сегментов сигнала f.

Ключевой сегмент соответствует участку сигнала, на котором максимален отклик небольшого количества операторов (одного-двух). Это означает, что сегмент сигнала подходит под образ операторов, давших максимальные отклики;

4) вычисление по каждому ключевому сегменту первых N по массе замкнутых групп (алгоритм вычисления групп и их масс рассматривается в [2]):

$$M_f = \bigcup_{i \in \overline{1,N}} P_{csi,i}$$

P_{csi}, i – набор замкнутых групп, вычисленных по сегменту i;

5) сравнение групп, сформированных по i-у и j-у сегментам сигнала: если состав групп совпадает не менее чем на M %, тогда считается, что сегменты сигнала подобны (с некоторой точностью) и расстояние dist между сегментами сохраняется в массив H:

$$H(\text{dist}) = H(\text{dist}) + 1;$$

6) определение номера максимального элемента $X_{\max}$ гистограммы H, который соответствует наиболее часто встречающемуся расстоянию между похожими спектрами (расстояние измеряется в отсчетах):

$$X_{\max} = \max(H);$$

7) вычисление частоты основного тона:

$$P = \frac{F_Д}{X_{\max}},$$

где P – частота основного тона, $F_Д$ – частота дискретизации речевого сигнала.

4. Вычислительный эксперимент

Рассмотрим результаты оценки частоты основного тона на основе предлагаемого и существующих алгоритмов. Оценка качества вычисления частоты основного тона выполняется с помощью следующих показателей:

1) количество значительных ошибок оценки основного тона (gross pitch error):

$$G = \frac{1}{N_V} \sum_{i \in V} \delta_G\left(F_m(i), F_a(i)\right),$$

$$\delta_G\left(F_m(i), F_a(i)\right) = \begin{cases} 1, \left|\left(F_m(i) - F_a(i)\right) / F_m(i)\right| > T, \\ 0, \text{иначе}; \end{cases}$$

2) среднее значение незначительной ошибки оценки основного тона (fine pitch error):

$$S = \frac{1}{N_V} \sum_{i \in V} \delta_S\left(F_m(i), F_a(i)\right),$$

$$\delta_S\left(F_m(i), F_a(i)\right) = \begin{cases} \left|F_m(i) - F_a(i)\right|, \left|\left(F_m(i) - F_a(i)\right) / F_m(i)\right| \le T, \\ 0, \text{иначе}; \end{cases}$$

3) среднеквадратическое отклонение незначительной ошибки оценки основного тона:

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_V} \sum_{i \in V} \delta_\sigma\left(F_m(i), F_a(i), S\right)},$$

$$\delta_\sigma\left(F_m(i), F_a(i), S\right) = \begin{cases} \left(F_m(i) - F_a(i)\right)^2 - S^2, \left|\left(F_m(i) - F_a(i)\right) / F_m(i)\right| \le T, \\ 0, \text{иначе}. \end{cases}$$

Используемые обозначения: $F_m(i)$ – ручная оценка частоты основного тона i-го отсчета сигнала; $F_a(i)$ – автоматическая оценка частоты основного тона i-го отсчета сигнала; T – порог, разделяющий грубые и незначительные ошибки оценки частоты основного тона; V – множество отсчетов исходного сигнала, относящихся к вокализованным сегментам; N_V – мощность множества V.

При тестировании алгоритмов использовалась база данных, описанная в [3]. База данных содержит записи голосов двух дикторов: мужчины (293,2 секунды) и женщины (370 секунд), ручную разметку записей на вокализованные-невокализованные сегменты с указанием частоты основного тона для вокализованных сегментов.

Таблица 1

Сигнал без шума

Показатель / Метод	АКФ [4]	YIN [5]	AMDF [6]	Кепстр [7]	YAAPT [8]	Предлагаемый
G	0.0313	0.0309	0.0753	0.1636	0.1685	0.0498
S	0.0472	0.0245	0.0063	0.0381	0.0227	0.0250
S_σ	0.0461	0.0277	0.0111	0.0337	0.0237	0.0284

Таблица 2

Сигнал искажен аддитивным равномерным шумом, ОСШ = 10 дБ

Показатель/ Метод	АКФ	YIN	AMDF	Кепстр	YAAPT	Предлагаемый
G	0.1519	0.0759	0.7567	0.3444	0.2462	0.1122
S	0.0489	0.0297	0.0202	0.0576	0.0225	0.0309
S_σ	0.0385	0.0294	0.0234	0.0521	0.0219	0.0360

Таблица 3

Сигнал искажен аддитивным нормальным шумом, ОСШ = 10 дБ

Показатель/ Метод	АКФ	YIN	AMDF	Кепстр	YAAPT	Предлагаемый
G	0.3871	0.2151	0.8342	0.4258	0.2812	0.3455
S	0.0400	0.0347	0.0416	0.0509	0.0206	0.0502
S_σ	0.0378	0.0361	0.0517	0.0495	0.0164	0.0394

Заключение

В работе рассматривается алгоритм оценки частоты основного тона голоса, основанный на теории активного восприятия. Анализ результатов вычислительного эксперимента позволяет сделать вывод, что разработанный алгоритм успешно справляется с поставленной задачей оценки частоты основного тона по неискаженным и искаженным записям голоса человека.

По сравнению с другими алгоритмами, работающими во временной области, предлагаемый алгоритм позволяет обрабатывать сложные периодические сигналы (с большим количеством гармоник) без предварительного сглаживания сигнала фильтрами нижних частот.

Результаты, полученные в работе, могут использоваться при разработке алгоритмов сжатия, улучшения качества звукового сигнала, настройке музыкальных инструментов, при создании нотной записи и классификации музыкальных произведений.

Литература

1. *Утробин В.А.* Физические интерпретации элементов алгебры изображения // Успехи физических наук. 2004. Т. 174, № 10. С. 1089–1104.

2. *Утробин В.А.* Компьютерная обработка изображений. Принятие решений в пространстве эталонов : учеб. пособие. Н. Новгород : НГТУ, 2004.

3. *Bagshaw P.C., Hiller S.M., Jack M.A.* Enhanced pitch tracking and the processing of F0 contours for computer and intonation teaching // Proceedings of European Conference on Speech Communication. 1993. P. 1003–1006.

4. *Аграновский А.В., Леднов Д А.* Теоретические аспекты алгоритмов обработки и классификации речевых сигналов. Москва : Радио и связь, 2004. 164 с.

5. *Cheveigne A., Kawahara H.* Yin, a fundamental frequency estimator for speech and music // Journal of the Acoustical Society of America. 2002. V. 111(4).

6. *Ross M.J.* Average magnitude difference function pitch extractor // IEEE Transactions on Speech and Audio processing. 1974. V. 22. P. 353–362.

7. *Wang F.P.* Yip Cepstrum analysis using discrete trigonometric transforms // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1991. V. 39(2). P. 538–541.

8. *Zahorian S.A., Hu H.* A spectral/temporal method for robust fundamental frequency tracking // Journal of Acoustic Society of America. 2008. № 123 (6). P. 4559–4571.

9. *Gerhard D.* Audio visualization in phase space // Bridges: Mathematical Connections in Art, Musicand Science. 1999. P. 137–144.

10. *Piszczalski M., Galler A.B.* Predicting musical pitch from component frequency ratios // Journal of the Acoustical Society of America. 1979. V. 66(3). P. 710–720.

11. *Moorer J.A.* On the transcription of musical sound by computer // Computer Music Journal. 1977. November. P. 32–38

12. *Geoffiois E.* The multi-lag-window method for robust extended-range f_0 determination // Fourth International Conference on Spoken Language Processing. 1996. V. 4. P. 2239–2243.

Метод эффективного удаления глазодвигательных артефактов на сигналах ЭЭГ с использованием процедуры ортогонализации Грама – Шмидта

В.В. Грубов[1,2], А.А. Короновский[1,2], Е.Ю. Ситникова[3], А.Е. Храмов[1,2]

[1]Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
[2]Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
[3]Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва
vvgrubov@gmail.com

Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) является одним из традиционных и наиболее часто используемых в нейрофизиологических исследованиях источником информации о работе головного мозга [1]. ЭЭГ представляет собой усредненную сумму токов, генерируемых группой нейронов в области регистрирующего электрода. Важность исследования ЭЭГ продиктована тем, что существует четкая корреляция между характером ритмической активности на ЭЭГ и функциональным состоянием организма [2].

Исследование ЭЭГ зачастую существенно затрудняется возникающими на записи артефактами. Артефактом является любая активность на сигнале ЭЭГ, не связанная с электрической активностью мозга. Все артефакты, возникающие при регистрации ЭЭГ, могут быть разделены на две большие группы: аппаратные артефакты физической природы и физиологические артефакты [3]. Артефакты физической природы могут быть вызваны искажением сигнала в аппаратуре регистрации ЭЭГ, плохой установкой электродов, нарушением контакта в подводящих проводах и т. д. От аппаратных артефактов сравнительно легко избавиться путем устранения соответствующих неполадок в оборудовании. Артефакты физиологической природы вызваны физиологическими сигналами «немозговой» природы, амплитуда которых обычно значительно превышает амплитуду ЭЭГ.

Электрический потенциал от движения глазных яблок, или электроокулограмма (ЭОГ) оказывает существенное влияние на ЭЭГ. Известно, что обменные процессы, протекающие в сетчатке глаза, генерируют стабильную разность потенциалов (порядка 1 мВ) между сетчаткой и роговой оболочкой. При неподвижном состоянии глазного яблока этот потенциал является одним из компонентов постоянной составляющей напряжения. Когда происходит закрывание глаз, глазное яблоко поворачивается вверх, что вызывает изменение разности потенциалов в окружающем объемнопроводящем пространстве. При открывании глаз глазное яблоко поворачивается вниз и также вызывает аналогичный потенциал. Такие перемещения глазного яблока приводят к появлению на ЭЭГ характерных зрительных артефактов, которые наиболее четко видны на лобных отведениях ЭЭГ [4].

Традиционно для удаления артефактов используются методы, основанные на регрессионном анализе, или методы анализа независимых компонент [5–7]. В последнем случае существуют различные комбинированные методики, в частности методы вейвлетного анализа независимых компонент [8]. Вместе с тем данные методы достаточно сложны и трудоемки. В случае, когда есть линейная комбинация артефакта и сигналов ЭЭГ, возможно использование более простых методик, основанных на известных математических подходах линейной алгебры.

В настоящем докладе предлагается новый метод для удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ с использованием процедуры ортогонализации Грама – Шмидта [9]. Данный метод основан на том факте, что потенциалы, наведенные движением глаз на электроды, регистрирующие ЭЭГ, линейно связаны с потенциалами, регистрируемыми в канале ЭОГ [10].

ЭОГ регистрируется стандартным образом: первый и второй электроды для регистрации вертикальных движений глазного яблока устанавливаются сверху и снизу одного глаза, а третий и четвертый электроды для регистрации горизонтальных движений – слева и справа от глаз, как показано на рис. 1.

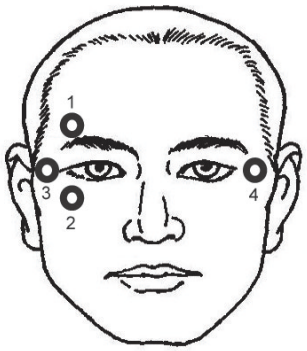


Рис. 1. Схема установки электродов для регистрации ЭОГ

Рассмотрим подробнее алгоритм метода. Пусть $g_i(t)$ – сигнал i-го канала предварительно записанной ЭЭГ, $h(t)$ и $s(t)$ – сигналы ЭОГ, регистрирующие вертикальные и горизонтальные движения глаз соответственно. Последовательно проводятся процедуры ортогонализации Грама – Шмидта.

$$g'_i(t) = g_i(t) - h^0(t)\int_{t_1}^{t_1+T} h^0(t')g_i(t')dt', \qquad (1)$$

$$\tilde{g}_i(t) = g'_i(t) - s^0(t)\int_{t_1}^{t_1+T} s^0(t')g_i(t')dt', \qquad (2)$$

где $\tilde{g}_i(t)$ – сигнал, соответствующий *i*-му каналу ЭЭГ с удаленными глазодвигательными артефактами, t – текущий анализируемый момент времени, t_1 и T – начало и длительность отрезка электроэнцефалограммы, на которой удаляются артефакты ($t \in [t_1, t_1 + T]$),

$$h^0(t) = \frac{h(t)}{\|h(t)\|},\ \|h(t)\| = \sqrt{\int_{t_1}^{t_1+T} (h(t))^2 dt}, \qquad (3)$$

$$s^0(t) = \frac{s(t)}{\|s(t)\|},\ \|s(t)\| = \sqrt{\int_{t_1}^{t_1+T} (s(t))^2 dt}. \qquad (4)$$

Процедура (1)–(4) повторяется для всех регистрируемых каналов ЭЭГ.

Данная процедура может использоваться и для обработки ЭЭГ для удаления артефактов в реальном времени. В этом случае необходимо использовать соотношения, аналогичные формулам (1)–(4):

$$g'_i(t) = g_i(t) - h^0(t) \int_t^{t+T/2} h^0(t') g_i(t') dt', \qquad (5)$$

$$\tilde{g}_i(t) = g'_i(t) - s^0(t) \int_t^{t+T/2} s^0(t') g_i(t') dt', \qquad (6)$$

$$h^0(t) = \frac{h(t)}{\|h(t)\|},\ \|h(t)\| = \sqrt{\int_{t}^{t+T/2} (h(t))^2 dt}, \qquad (7)$$

$$s^0(t) = \frac{s(t)}{\|s(t)\|},\ \|s(t)\| = \sqrt{\int_{t}^{t+T/2} (s(t))^2 dt}, \qquad (8)$$

где t – это анализируемый момент времени, T – ширина временного окна, $t + T/2$ –регистрируемый «текущий» момент времени; остальные обозначения совпадают с вышеуказанными. В модификации способа удаления артефактов в реальном времени сигнал ЭЭГ без артефактов $\tilde{g}_i(t)$ определяется с задержкой во времени $t - T/2$.

Предлагаемый метод был протестирован на ЭЭГ добровольцев – здоровых мужчин и женщин в возрасте 30–35 лет. Регистрация ЭЭГ проводилась с использованием стандартной системы размещения электродов на поверхности головы (система 10–20). Частотный диапазон многоканальной ЭЭГ ограничивался полосовыми фильтрами с полосами пропускания 0,5–49 Гц и 51–75 Гц, амплитуда сигналов после усилителя варьировалась от 0,02 до 2 В. Запись сигналов ЭОГ, фиксирующих вертикальные и горизонтальные движения глазного яблока, осуществлялась с использованием электродов, расположение которых приведено на рис. 1.

Длительность записи составляла 12 минут, в течение которых испытуемым предлагалось провести 4 минуты в спокойном расслабленном состоянии, далее в течение 2 минут не моргать и постараться не совершать горизонтальные движения глазами, далее 2 минуты активного движения глаз и далее опять 4 минуты свободного расслабленного состояния. Типичные сигналы различных каналов ЭЭГ, регистрируемые в ходе наблюдений в фазе активного движения глазами, представляли собой сигналы, на которые накладываются высокоамплитудные низкочастотные паттерны, соответствующие движениям глаз в горизонтальном и вертикальном направлениях, – глазодвигательные артефакты.

Рисунок 2 иллюстрирует предлагаемый метод. На рис. 2, *а* приведены фрагменты типичной ЭЭГ с высокоамплитудными глазодвигательными артефактами для двух каналов электроэнцефалограммы, снимаемой из различных точек головного мозга – отведение «Fp1–A1» из лобной доли правого полушария головного мозга (расположена вблизи правого глаза и регистрирующих ЭОГ электродов) и отведение «F3–A1» из лобной доли левого полушария головного мозга (расположена вдали от регистрирующих ЭОГ электродов).

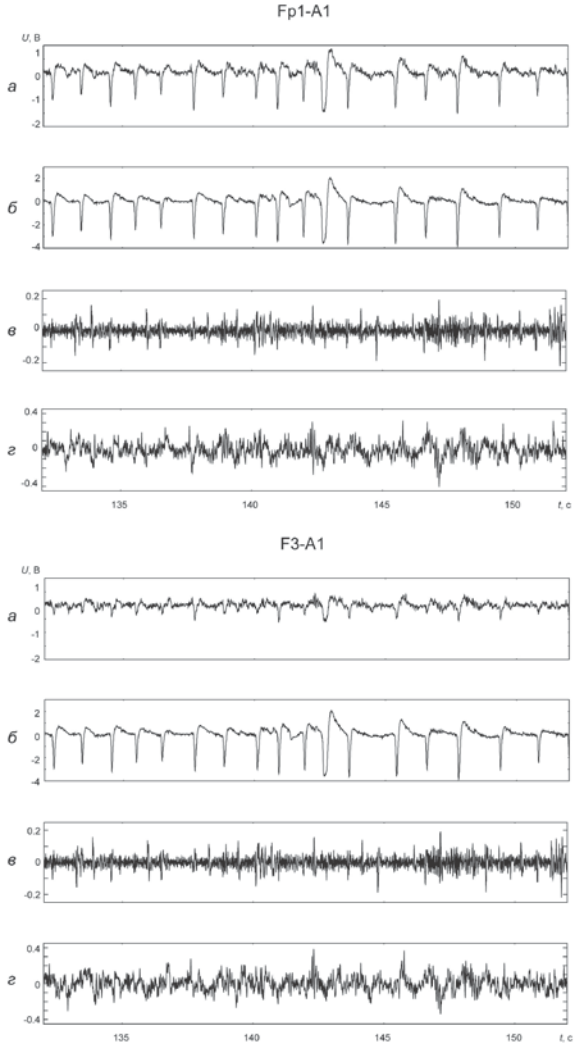


Рис. 2. Пример работы заявленного метода: типичная ЭЭГ с глазодвигательными артефактами (*а*), вертикальная и горизонтальная ЭОГ соответственно (*б, в*), очищенная от артефактов ЭЭГ (*г*)

Одновременно регистрируемые ЭОГ, фиксирующие вертикальные и поперечные движения глаз, показаны на рис. 2, *б, в.* Результат обработки сигналов отведений «Fp1–A1» и «F3–A1» ЭЭГ с использованием вышеописанной методики (1)–(4), базирующейся на методе ортогонализации Грама – Шмидта, показаны на рис. 2, *г*. Хорошо видно, что

предложенный и апробируемый метод эффективно удаляет глазодвигательные артефакты из сигналов ЭЭГ, не требуя ручного труда и сложных процедур обработки данных. Возможна эффективная реализация данного метода для удаления артефактов в режиме реального времени (в режиме on-line).

Аналогичные результаты были получены при анализе и удалении глазодвигательных артефактов на ЭЭГ всех добровольцев (12 человек: 8 мужчин и 4 женщины).

Авторы выражают глубокую благодарность д.б.н., профессору Г.А. Иваницкому за обсуждения и помощь в выполнении данной работы.

Работа поддержана РФФИ (проекты 12-02-00221 и 13-04-00084), а также Министерством образования и науки РФ (государственное задание высшим учебным заведениям на 2013-й и плановый период 2014 и 2015 годов в части проведения научно-исследовательских работ, проект СГТУ-79).

Литература

1. *Niedermeyer E., da Silva F.L.* Electroencephalography : Basic principles, clinical applications, and related fields. Lippincott Williams & Wilkins, 2004. P. 1256.

2. *Nunez P.L., Srinivasan K.* Electric fields of the brain : The neurophysics of EEG. Oxford University Press, 1981. P. 611.

3. *Гнездицкий В.В.* Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография. М. : МЕДпресс-информ, 2004. 624 с.

4. *Кожевников В.А., Мещерский М.Р.* Современные методы анализа электроэнцефалограммы. М. : Медицина, 1963. 327 с.

5. *Gratton G., Coles M.G.H., Donchin E.* A new method for off-line removal of ocular artifact // Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. 1983. V. 55. P. 468–484.

6. *Bell A.J., Sejnowski T.J.* An Information-Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution // Neural Comput. 1995. V. 7. P. 1129.

7. *Joyce C.A., Gorodnitsky I.F., Kutas M.* Automatic removal of eye movement and blink artifacts from EEG data using blind component separation // Psychophysiology. 2004. V. 41. P. 313.

8. *Павлов А.Н., Храмов А.Е., Короновский А.А., Ситникова Е.Ю., Макаров В.А., Овчинников А.А.* Вейвлет-анализ в нейродинамике // УФН. 2012. Т. 182, № 9. С. 905–939.

9. *Беклемишев Д.В.* Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М. : Физматлит, 2005. 304 с.

10. *Иваницкий Г.А.* Распознавание типа решаемой задачи по нескольким секундам ЭЭГ с помощью обучаемого классификатора : дис. ... д. биол. наук / ИВНД РАН. М., 2007.

Анализ сигналов головного мозга с использованием метода эмпирических мод

В.В. Грубов[1,2], Е.Ю. Ситникова[3], Е.В. Корнеева[3], А.А. Короновский[1,2], А.Е. Храмов[1,2]

[1]Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
[2]Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
[3]Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва
vvgrubov@gmail.com

В нейрофизиологических исследованиях для анализа работы головного мозга традиционно используют запись электрической активности нейронных ансамблей – электроэнцефалограммы (ЭЭГ) [1]. ЭЭГ представляет собой сумму токов, генерируемых группой нейронов в области регистрирующего электрода. На сигнале ЭЭГ принято выделять несколько частотных диапазонов: альфа, бета, гамма и т. д. Доказано, что существует четкая корреляция между характером ритмической активности на ЭЭГ в определенном частотном диапазоне (наличием того или иного осцилляторного паттерна) и функциональным состоянием живого организма [2]. Таким образом, важной задачей при исследовании нервной системы является изучение определенных осцилляторных паттернов, а также закономерностей их появления в различных состояниях живого организма.

В настоящее время для решения данной задачи все чаще используются радиофизические методы анализа и диагностики поведения сложных колебательных систем. Данные методы хорошо зарекомендовали себя при исследовании систем самой различной природы, в том числе биологической [3, 4].

Одним из таких новых методов, разработанных в последнее десятилетие в теории колебаний, является метод разложения по эмпирическим модам, который позволяет представить исследуемый сигнал в виде суммы амплитудно-модулированных компонентов (мод) с нулевым средним [5]. Данный метод находит в настоящее время применение при частотно-временном анализе многочастотных сигналов.

Процедура разложения сигнала по эмпирическим модам заключается в следующем. На отрезке сигнала $x(t)$ между двумя последовательными экстремумами (например, между двумя минимумами в моменты времени t_- и t_+) можно ввести локальную высокочастотную (ВЧ) составляющую $d(t)$, $t_- \le t \le t_+$. Аналогично можно ввести низкочастотную (НЧ) составляющую $m(t)$ следующим образом: $m(t) = x(t) - d(t)$. Таким образом, сигнал на отрезке $t_- \le t \le t_+$ представляется в виде суммы ВЧ и НЧ-компонентов. Повторяя процедуру n раз для низкочастотной составляющей, можно разложить сигнал на набор мод. Алгоритм метода выглядит следующим образом:

1. Нахождение всех экстремумов сигнала $x(t)$.

2. Интерполяция сигнала между минимумами (максимумами) и построение огибающих $e_{\min}(t)$ и $e_{\max}(t)$.

3. Расчет средней низкочастотной составляющей $m(t) = \dfrac{e_{\min}(t) + e_{\max}(t)}{2}$.

4. Выделение высокочастотной составляющей $d(t) = x(t) - m(t)$.

5. Повторение пунктов 1–4 для НЧ-составляющей части сигнала $m(t)$. В п. 1 вместо $x(t)$ необходимо использовать $m(t)$.

Очевидно, что первая эмпирическая мода $d_1(t)$ будет самой ВЧ, а с ростом номера моды частота будет уменьшаться, поэтому высшие эмпирические моды окажутся НЧ. Среднее значение каждой эмпирической моды нулевое.

В рамках данной работы были рассмотрены несколько вариантов применения метода разложения по эмпирическим модам: как для частотно-временного анализа и автоматической разметки, так и для адаптивной фильтрации ЭЭГ.

Частотно-временной анализ различных ритмических компонент на ЭЭГ особенно важен в исследованиях различных патологий центральной нервной системы, поскольку различные осцилляторные компоненты на ЭЭГ могут выступать в роли диагностических признаков того или иного заболевания.

Одним из распространенных типов осцилляторной активности на ЭЭГ являются сонные веретена, которые представляют собой короткие (0,5–1,5 с) эпизоды колебаний с частотой 10–15 Гц и характерной веретеноподобной формой [6]. Также выделяют 5–9 Гц осцилляции, которые имеют сходную с веретенами форму, но формируются в коре головного мозга и имеют более низкую частоту – 5–9 Гц.

Интерес к изучению сонных веретен и 5–9 Гц осцилляций продиктован их возможной связью с эпилепсией [7]. Известно, что сонные веретена формируются вследствие синхронной работы нейронной сети, объединяющей нейроны коры и таламуса, но эта же сеть при определенных условиях может порождать эпилептическую активность – пик-волновые разряды [8]. Пик-волновые разряды служат диагностическим признаком абсанс-эпилепсии, и их возникновение на ЭЭГ сопровождается характерными клиническими проявлениями. Существует связь между механизмами сонных веретен, 5–9 Гц осцилляций и пик-волновых разрядов, но эта связь оказывается сложной и неочевидной.

В данной работе анализ эпилептических осцилляторных паттернов проводился на примере ЭЭГ крыс линии WAG/Rij с наследственной пред-

расположенностью к абсанс-эпилепсии. Запись проводилась в течение 24 часов, поэтому содержит различные события: фрагменты с ярко выраженными сонными веретенами и 5–9 Гц осцилляциями, приступы эпилепсии, которым соответствуют пик-волновые разряды, а также типичные фрагменты бодрствования, на которых присутствует только фоновая составляющая ЭЭГ. Сигналы ЭЭГ предварительно фильтровались в диапазоне 0,5–100 Гц. Экспериментальная работа проводилась в Институте высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва.

В ходе исследования метод разложения по эмпирическим модам применялся к коротким отрезкам ЭЭГ, содержащим исследуемые паттерны. На рис. 1 и 2 представлены примеры таких отрезков и первые три эмпирические моды для них.

Из анализа примера для сонного веретена (см. рис. 1) можно сделать вывод, что первая эмпирическая мода хорошо выделяет сонные веретена, в то время как 5–9 Гц осцилляции и фоновая составляющая ЭЭГ имеют достаточно малую амплитуду. Также очевидно, что вторая эмпирическая мода выделяет более низкочастотные составляющие ЭЭГ, в том числе 5–9 Гц осцилляции. Третья мода включает низкочастотные колебания, накладывающиеся на сонные веретена и 5–9 Гц осцилляции и не несет полезной информации.

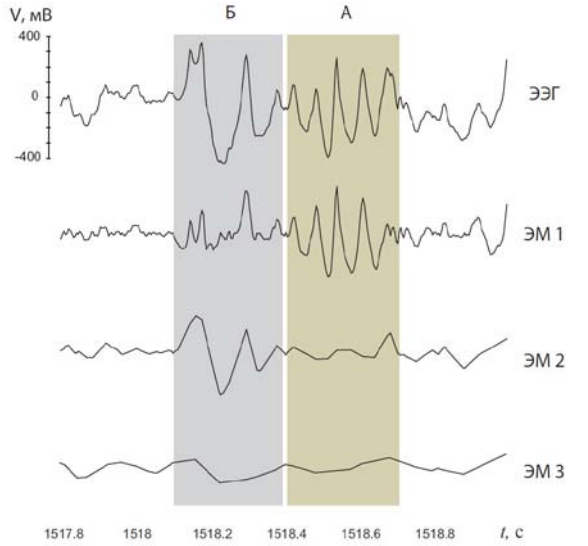


Рис. 1. Пример отрезка ЭЭГ, содержащего сонное веретено (*А*) и 5–9 Гц колебание (*Б*), а также первые три эмпирические моды для него

Анализ различных эмпирических мод для пик-волнового разряда (рис. 2) показывает, что первая мода выделяет вторую и третью гармоники осцилляций, возникающих в течение разряда (пики). Вторая мода четко выделяет первую гармонику (основной ритм) колебаний в разряде (волны). Наконец, третья эмпирическая мода, как и в случае с рис. 1, соответствует низкочастотным колебаниям, в частности накладывающимся на пик-волновой разряд.

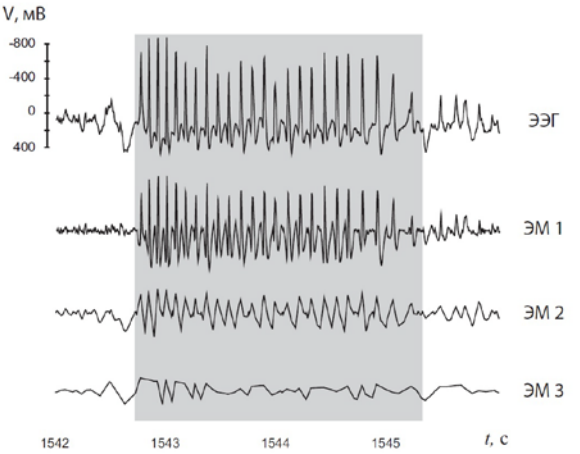


Рис. 2. Пример отрезка ЭЭГ, содержащего пик-волновой разряд, а также первые три эмпирические моды для него

Как видно из анализа, методика разложения ЭЭГ по эмпирическим модам позволяет эффективно выделять сонные веретена. Это свойство легло в основу нового метода для автоматического выделения сонных веретен на ЭЭГ.

За основу был взят метод, предложенный в работах [9, 10], однако также был внесен и ряд изменений. Так, в данном методе вместо исходного сигнала ЭЭГ анализируется его первая эмпирическая мода, для которой выполняется непрерывное вейвлетное преобразование [11] и рассчитывается сначала мгновенная, а затем усредненная по характерному частотному диапазону энергия $w(t)$. Вывод о наличии в сигнале сонного веретена в данный момент времени делается при превышении усредненной энергией $w(t)$ экспериментально определяемого порогового значения w_{cr}:

$$w(t) > w_{cr}. \qquad (1)$$

Алгоритм метода был следующим:

1. Расчет первой эмпирической моды для исследуемого сигнала ЭЭГ.

2. Расчет мгновенной энергии вейвлетного преобразования $W(f_s, t)$ для первой эмпирической моды.

3. Усреднение $W(f_s, t)$ по характерному для сонных веретен частотному диапазону (расчет $w(t)$).

4. Проверка критерия (1).

В ходе исследования разработанный метод был применен к использованным ранее 24-часовым записям ЭЭГ для получения автоматической разметки сонных веретен. Пример работы метода представлен на рис. 3.

Результат работы метода – разметка сонных веретен – сравнивался с разметкой опытного эксперта-нейрофизиолога. Было обнаружено, что метод для выделения сонных веретен на ЭЭГ с использованием разложения сигнала по эмпирическим модам обладает большей эффективностью по сравнению с исходным методом, базирующимся только на вейлетном анализе.

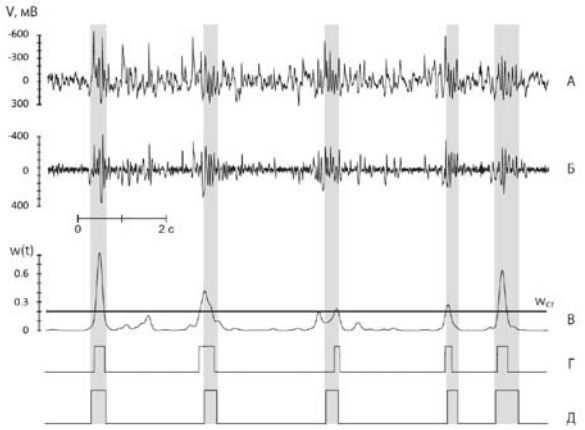


Рис. 3. Отрезок ЭЭГ (*А*), первая эмпирическая мода для него (*Б*), усредненная энергия *w*(*t*) для первой эмпирической моды (*В*), результат работы метода – разметка сонных веретен (*Г*), а также разметка эксперта (*Д*)

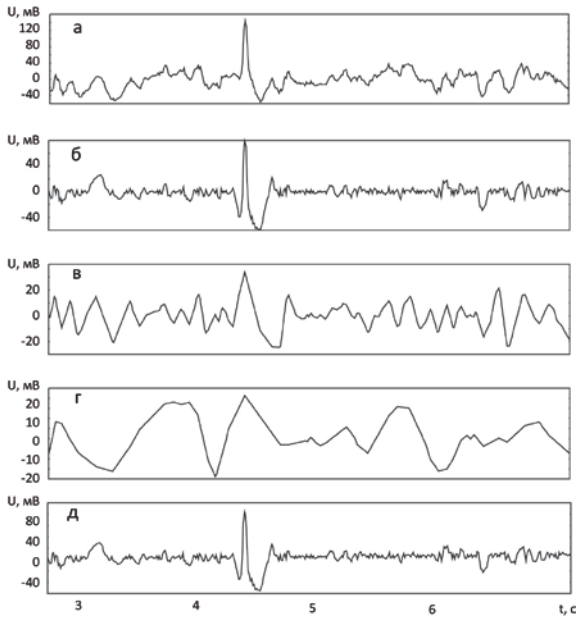


Рис. 4. Отрезок ЭЭГ (*а*), первые три эмпирические моды для него (*б*, *в*, *г*), ЭЭГ с удаленными старшими эмпирическими модами (*д*)

Наконец, еще одним вариантом применения метода разложения по эмпирическим модам стала фильтрация ЭЭГ. Исследование ЭЭГ зачастую осложняется возникающими на записи артефактами. Обычно артефакты подразделяют на артефакты физической и физиологической природы [12]. От многих артефактов невозможно избавиться на этапе записи ЭЭГ, поэтому задача фильтрации ЭЭГ оказывается весьма актуальной.

В рамках данной работы рассматривалась фильтрация ЭЭГ птенцов. Для этой записи большая часть артефактов оказалась лежащей в области низких частот – порядка 1,5–2 Гц. Для птичьих ЭЭГ был проведен частотно-временной анализ с помощью метода разложения по эмпирическим модам, и было обнаружено, что диапазон частот 1,5–2 Гц в основном приходится на третью и более старшие эмпирические моды сигнала ЭЭГ.

Таким образом, был предложен метод адаптивной фильтрации птичьих ЭЭГ от низкочастотных помех путем удаления старших эмпирических мод из исходного сигнала. Суть метода заключается в том, что проводится разложение анализируемого отрезка ряда по эмпирическим модам, выделяются две первые ВЧ-моды, по которым далее восстанавливается сигнал отфильтрованной ЭЭГ. На рис. 4 представлен пример работы метода.

Работа поддержана РФФИ (проекты 12-02-00221 и 13-04-00084), а также Министерством образования и науки Российской Федерации (государственное задание высшим учебным заведениям на 2013-й и плановый период 2014 и 2015 годов в части проведения научно-исследовательских работ, проект СГТУ-79).

Литература

1. *Niedermeyer E., da Silva F.L.* Electroencephalography: Basic principles, clinical applications, and related fields. Lippincott Williams & Wilkins, 2004. P. 1256.

2. *Nunez P.L., Srinivasan K.* Electric fields of the brain: The neurophysics of EEG. Oxford University Press, 1981. P. 611.

3. *Buzsaki G., Draguhn A.* Neuronal oscillations in cortical networks // Science. 2004. V. 304. P. 1926–1929.

4. *Некоркин В.И.* Нелинейные колебания и волны в нейродинамике // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, вып. 3. С. 313.

5. *Huang N.E., Shen Z., Long S.R. et al.* The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. Soc. A. 1998. V. 454. P. 903.

6. *De Gennaro L., Ferrara M.* Sleep spindles: an overview // Sleep Med. Rev. 2003. V. 7. P. 423.

7. *Kostopoulos G.* Spike-and-wave discharges of absence seizures as a transformation of sleep spindles: the continuing development of a hypothesis // Clin. Neurophysiol. 2000. V. 111. P. 27.

8. *Van Luijtelaar E.L.* Spike-wave discharges and sleep spindles in rats // Acta Neurobiologiae Experimentalis. 1997. V. 57. P. 113.

9. *Грубов В.В., Овчинников А.А., Ситникова Е.Ю., Короновский А.А., Храмов А.Е.* Вейвлетный анализ сонных веретен на ЭЭГ и разработка метода их автоматической диагностики // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, вып. 4. С. 91–108.

10. *Грубов В.В.* Метод выделения двух типов активности нейронного ансамбля головного мозга в течение сна по сигналам электроэнцефалограмм // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, вып. 1. С. 133–138.

11. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М. : Физматлит, 2003. 176 с.

12. *Гнездицкий В.В.* Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография. М. : МЕДпресс-информ, 2004. 624 с.

Ранняя диагностика эффектов воздействия слабых алкогольных напитков в хаотической динамике

Д.Д. Даянова, М.А. Филатов, К.В. Чепуркина, Э.М. Газизова, С.Н. Ватамова

Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, Сургут
karmacurator@mail.ru

Введение

Статистические данные показывают, что в России за год выпивается 2,5 миллиарда литров чистого спирта, это примерно по 18 литров на человека. По данным Всемирной организации здравоохранения порог безопасности нации стоит на уровне потребления 8 литров, большее потребление говорит о вырождении нации. Смертность в России почти в два раза превышает среднемировую. Эксперты считают, что основной причиной этого является чрезмерное употребление алкоголя [1, 3].

Объектом исследования были выбраны молодые люди от 21 до 30 лет, находящиеся в отличной физической форме, которые вообще не употребляют алкогольные напитки либо употребляют не часто и в малых количествах.

Возникает вопрос: какие же изменения происходят в организме человека, который употребляет алкогольные напитки изредка или время от времени? Данное исследование направлено на изучение динамики поведения функциональных систем организма человека с точки зрения теории хаоса – самоорганизации (ТХС).

В современном мире люди активно употребляют слабоалкогольные напитки, наиболее популярным является такой всем известный алкогольный напиток, как пиво. В различных публикациях было показано, что параметры функциональных систем организма (ФСО) демонстрируют хаотическую динамику, и по этой хаотической динамике можно судить о состоянии ФСО [2].

Целью настоящего исследования является изучение хаотической динамики параметров сердечно-сосудистой системы (ССС) человека под воздействием слабоалкогольных напитков.

Объект и методы исследований

Для проведения эксперимента была отобрана группа испытуемых (аспиранты и сотрудники СурГУ) в количестве 34 человек и возрасте от 21 до 30 лет. Все испытуемые на момент проведения эксперимента находились в хорошей физической форме. Эксперимент проводился в 3 этапа. На первом этапе (до употребления слабоалкогольного напитка) у испытуемых регистрировались параметры ССС в спокойном состоянии (при отсутствии выраженных воздействий). На втором этапе каждому испытуемому был предложен алкогольный напиток в объеме 250 мл с содержанием спирта 4,2 % (пиво). Через 5 минут после употребления алкогольного напитка повторно регистрировались параметры ФСО (момент первичного алкогольного опьянения). На третьем этапе испытуемым было предложено дополнительно по 250 мл того же самого алкогольного напитка.

Информация о состоянии параметров вариабельности сердечного ритма была получена с использованием пульсоксиметра ЭЛОКС-01 М. В устройстве ЭЛОКС-01 М используется фотооптический датчик, с помощью которого регистрируется пульсовая волна с одного из пальцев испытуемого в положении сидя в течении 5-минутного интервала. Данные обрабатывались методами теории хаоса – самоорганизации, рассчитаны квазиаттракторы (КА), их площади V_G для оценки уровня вариабельности сердечных сокращений.

Одним из фундаментальных свойств вектора состояния любой биологической динамической системы (БДС), которые мы сейчас относим к системам третьего типа, или complexity, является свойство постоянной вариабельности, т. е. непрерывной вариации в динамике поведения вектора состояния системы (ВСС) в некоторых ограниченных объемах V_G фазового пространства состояний (ФПС), которые мы определяем как квазиаттракторы – КА. Удержание параметров ВСС в таких пределах ФПС оказывается достаточным для поддержания гомеостаза в рамках нормы (нормогенеза) для любых ФСО и организма в целом.

В качестве основного параметра использовались значения межимульсных интервалов сердечных сокращений. Для сравнительного анализа использовались статистические методы обработки данных, в частности были рассчитаны значения энтропии Шеннона как показателя уровня хаоса в сигнале [3].

Реакция сердечно-сосудистой системы человека в ответ на воздействие слабоалкогольных напитков

На рисунках 1–3 представлена реакция ССС человека при воздействии слабоалкогольных напитков в сравнении с состоянием без воздействия.

При спектральном анализе ВСР принято выделять три спектральных компоненты: высокочастотную (high frequency – HF, 0,15–0,40 Гц), отражающую парасимпатическое влияние на сердце; низкочастотную (low frequency – LF, 0,04–0,15 Гц), отражающую как парасимпатическое, так и симпатическое влияние; очень низкочастотную (very low frequency – VLF, 0,003–0,04 Гц), отражающую, как полагают, в основном активность симпатического звена регуляции. Согласно рекомендациям отечественных и зарубежных авторов отношение нормализованных спектральных мощностей низкочастотной компоненты к высокочастотной (LF_n/HF_n) следует рассматривать в качестве показателя симпатовагального баланса.

Из рисунка 1 видно, что на втором этапе исследования спектр сердечных сокращений значи-

тельно изменился: увеличилась амплитуда колебаний на некоторых частотах, квазиаттрактор расширился, и повысилась хаотичность сердечных сокращений (это можно видеть по ритмограммам – рис. 1, *А*). На третьем этапе вариабельность сердечных сокращений существенно снижается, а частота сердечных сокращений увеличивается. Уменьшаются амплитуды колебаний, и спектр колебаний перемещается из зоны низких частот в зону средних частот.

До употребления слабоалкогольного напитка площадь КА V_G = 17600, после употребления слабоалкогольного напитка площадь КА увеличилась до V_G = 22100, а при повторном употреблении площадь КА уменьшилась до V_G = 13000.

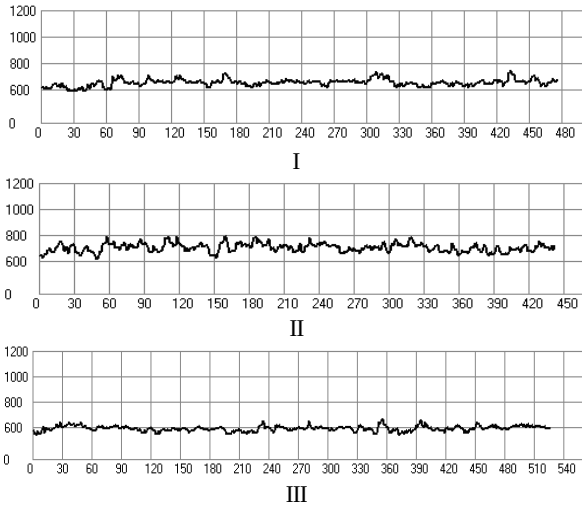


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика сигнала $x_1(t)$ по данным пульсоинтервалографии: I – до употребления алкоголя; II – через 5 мин после употребления 250 мл слабоалкогольного напитка; III – после повторного употребления 250 мл слабоалкогольного напитка

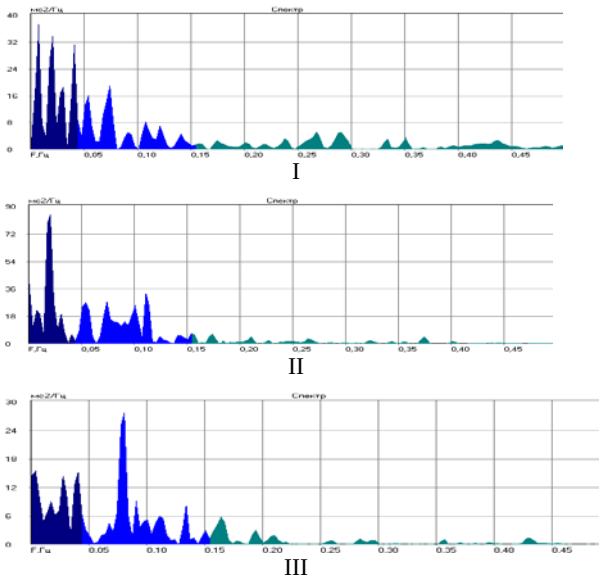


Рис. 2. Фазовый портрет сигнала на плоскости с координатами x_1, $x_2 = dx_1/dt$ по данным пульсоинтервалографии: I – до употребления алкоголя; II – через 5 мин после употребления 250 мл слабоалкогольного напитка; III – после повторного употребления 250 мл слабоалкогольного напитка

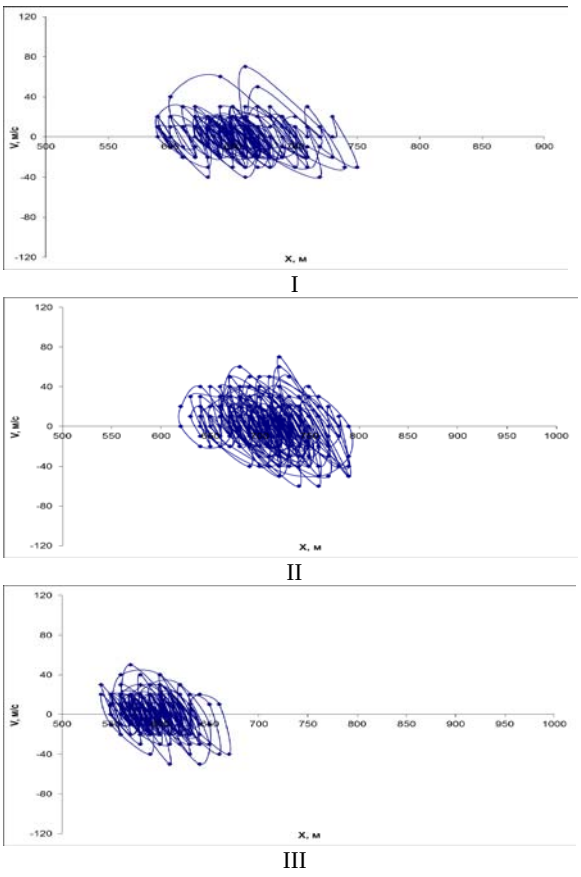


Рис. 3. Ритмограмма кардиоинтервалов $x_1 = x_1(t)$ по данным пульсоинтервалографии для испытуемого Yu: I – до употребления алкоголя; II – через 5 мин после употребления 250 мл слабоалкогольного напитка; III – после повторного употребления 250 мл слабоалкогольного напитка.

Заключение. В результате проведенного исследования были показаны значительные изменения в динамике параметров ФСО человека в рамках ТХС. При этом самые значительные изменения наблюдаются на втором этапе эксперимента, т. е. через 5 мин после употребления 1-й дозы алкоголя. В свою очередь, на третьем этапе наблюдается некоторая стабилизация состояния параметров ФСО человека, т. е. стремление параметров к исходному (нормогенезу). Это может быть объяснено тем, что организм человека при первичном попадании алкоголя в организм испытывает значительный стресс, а затем в результате различных механизмов адаптации и саморегулирования стабилизирует свое состояние.

Литература

1. *Еськов В.М., Хадарцев А.А., Филатова О.Е.* Синергетика в клинической кибернетике. Часть II : Особенности саногенеза и патогенеза в условиях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры / под ред. А.И. Григорьева. Самара : Офорт, 2007. С. 292.
2. *Гавриленко Т.В., Балтикова А.А., Еськов В.М. и др.* Хаотическая динамика непроизвольных движений конечностей человека в 4-мерном фазовом пространстве // Сложность. Разум. Постнеклассика. Сургут, 2012. № 1. С. 86.
3. *Чеснокова С.А.* Физиология человека. М. : Медицинская книга ; Н. Новгород : Изд-во НГМА, 2001. 526 с. : ил.

Анализ связи между уровнем владения английским языком и параметрами звуколокализационной функции у учеников 3-го и 10-го класса

В.А. Демарева[1], С.А. Полевая[1,2]

[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2]Нижегородская государственная медицинская академия
kaleria.naz@gmail.com

Изучение иностранного языка дает человеку возможность личностного и профессионального развития, возможность самосовершенствоваться, путешествовать, открывать и узнавать новое. Известно, что любая новая информация во всех сферах современной жизни публикуется на английском языке или с переводом на английский язык. Сегодня фактически более 250 миллионов человек изучают английский язык.

При необходимости освоения языка человек в любом случае сталкивается с множеством проблем. В частности, с тем, что освоение языка происходит в неоптимальных для человека состояниях. Оптимальным мы называем состояние, когда освоение языка происходит с минимальной затратой ресурсов и отличается эффективностью и устойчивостью. Таким образом, на данный момент актуальны поиски маркеров оптимальных функциональных состояний мозга для приобретения компетенций в английском языке.

Известно, что в разное время при обучении иностранным языкам во главу угла ставилось то обучение языку в его лингвистических аспектах (грамматико-переводный, лексико-переводный, или аналитический, метод), то обучение речи, то практическое владение иностранным языком (натуральные, прямые и интенсивные методы обучения) (Сухобская, 1959; Соссюр, 1977; Лурия, 2009). Существуют различные психологические и лингвистические тесты для прогнозирования будущей успешности в обучении иностранным языкам. Эти тесты позволяют оценить уровень речевого развития, что подразумевает владение лексикой родного языка, быстроту улавливания лексико-грамматических особенностей в незнакомом языке, способность к самостоятельному установлению языковой закономерности, объем памяти на иноязычные слова, способность к слуховому восприятию и т. д. (Мельник, 1970; Лозанов, 1973; Ушакова, 1979; Кондухов, 1979; Кондрашов, 2009). Некоторые из них (Pimsleur, 1967) образуют «батареи тестов» языковых способностей.

Так или иначе, все эти методики имеют следующие недостатки: низкая надежность, необходимость в эксперте, опора только на среднестатистические знания, полное отсутствие знаний о маркерах конкретного человека.

Поскольку при дихотическом прослушивании с нарастающей межушной задержкой задействованы очень тонкие нейронные механизмы, мы предполагаем, что существует связь между параметрами звуколокализационной функции и уровнем владения английским языком.

Таким образом, цель данного исследования – поиск специфичных параметров звуколокализационной функции, определяющих оптимальное функциональное состояние для решения задач на английском языке учащимися специализированной лингвистической школы.

В исследовании в 2011 году приняли участие 7 учеников 3-го класса гимназии с углубленным изучением английского языка. В исследовании 2013 года приняли участие 25 учеников 10-го класса той же школы.

Для оценки параметров звуколокализационной функции использовался метод компьютерной латерометрии. Для получения данных об уровне владения английским языком использовался набор из 14 задач (для учеников 3-го класса) и Placement Test (для учеников 10-го класса). Ученики были распределены по трем уровням владения языком в зависимости от итоговой суммы балла за тестирование.

Было получено, что при доминировании левого полушария у большинства учеников как 3-го, так и 10-го класса наблюдается более успешное решение лингвистических задач.

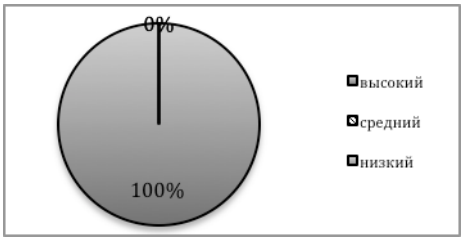


Рис. 1. Распределение учеников 3-го класса по уровням владения английским языком при левополушарной доминантности по $dT_{\min}$

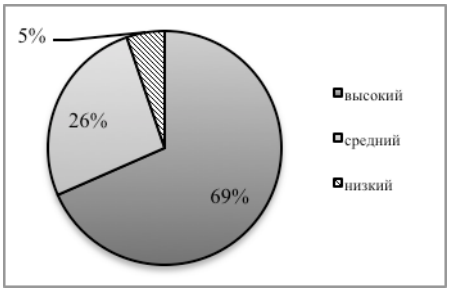


Рис. 2. Распределение учеников 10-го класса по уровням владения английским языком при левополушарной доминантности по $dT_{\min}$

Таким образом, левополушарная доминантность по $dT_{\min}$ является возможным маркером оптимального функционального состояния для решения лингвистических задач.

Также было получено, что ученики, попавшие в группу с высоким уровнем знания английского языка, отличаются более высокими показателями параметра $dT_{\min}$ Left, чем представители групп со средним и низким уровнем владения языком. Эта зависимость обнаружено и в 3-м, и в 10-м классе.

Исходя из этого, можно заключить, что чем хуже работает правое полушарие, тем лучший балл по английскому получают ученики.

Это согласуется с полученными Т.В. Черниговской данными, о том, что при угнетении правого полушария иностранный язык находится в более выгодном положении, чем родной язык.

Далее был проведен анализ связей параметров звуколокализационной функции у учеников 10-го класса с высоким, средним и низким уровнем владения английским языком.

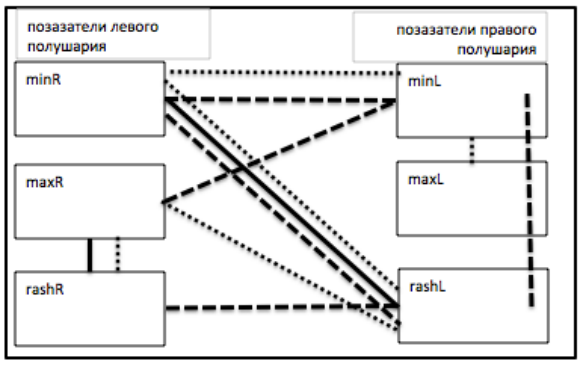


Рис. 3. Корреляционная матрица показателей звуколокализационной функции у учеников с низким (▬), средним (▬ ▬) и высоким (▪▪▪▪▪▪) уровнем владения английским языком

Мы получили, что в группе с низким уровнем владения английским языком связаны 2 параметра звуколокализационной функции, со средним – 5 и с высоким – 7. Таким образом, чем выше уровень владения языком, тем более связаны между собой показатели звуколокализационной функции.

Литература

1. *Кондрашов Н.А.* История лингвистических учений. М.: URSS, 2009.
2. *Кондухов В.И.* Введение в языкознание. М. : Русь, 1979.
3. *Лурия А.Р.* Основные проблемы нейролингвистики. Изд. 3-е. М. : URSS, 2009.
4. *Мельник С.И.* Методика работы над лексикой иностранного языка в интенсивном курсе устной речи : автореф. дис. ... канд. пед. наук. М., 1970.
5. *Морозенко В.В., Фоломкина С.К.* Тестирование по иностранным языкам в США. М. : Высшая школа, 1970.
6. *Полевая С.А.* Интеграция эндогенных факторов в систему обработки экстероцептивных сигналов : автореф. дис. ... д. биол. наук. 2009. URL: http://vak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/vak/announcements/biolog/2009/14-09/PolevayaSA.pdf (дата обращения: 25.11.2011).
7. *Реброва Н.П.* Взаимосвязь биологических и психологических характеристик личности: гендерный аспект // Гендерная психология. СПб. : Питер, 2006.
8. *Ротенберг В.* Межполушарная асимметрия, ее функция и онтогенез // Руководство по функциональной межполушарной асимметрии. М. : Научный мир, 2009.
9. *Соссюр Ф. де.* Труды по языкознанию. М. : Прогресс, 1977.
10. *Сухобская Г.С.* Об автоматизации умственных действий // Вопросы психологии. 1959. № 3. С. 74–86.
11. *Ушакова Т.Н.* Функциональные структуры второй сигнальной системы. Психофизиологические механизмы речи. М. : Наука, 1979.
12. *Черниговская Т.В.* Курс дистанционного обучения психолингвистике / Лаборатория интеллектуальных систем Института высокопроизводительных технологий и баз данных при поддержке Российского гуманитарного научного фонда (грант 97-04-12035в). URL: http://www.csa.ru/DistanceLearning/course3/ch20/ch20_3_1.html (дата обращения 15.11.2011).
13. *Blauert J.* Spatial hearing: The psychophysics of human sound localization. Cambridge, MA : MIT Press, 1997. 267 p.
14. *Litovsky R.Y., Colburn H.S., Yost W.A., Guzman S.J.* The precedence effect // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 106, № 4. Pt. 1. P. 1633–1654.
15. *Pimsleur P.* A memory shedule. 1967. URL: http://www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/contentdelivery/servlet/ERICServlet?accno=ED012150 (дата обращения 01.09.2011).
16. *Sanders L.D., Amy S.J., Keen R.E., Freyman R.L.* One sound or two? Object-related negativity indexes echo perception // Perception & Psychophysics. 2008. V. 70, № 8. P. 1558–1570.
17. *Tollin D.J., Yin T.C.* Psychophysical investigation of an auditory spatial illusion in cats: the precedence effect. // J. Neurophysiol. 2003. V. 90, № 4. P. 2149–2162.
18. *Wallach H., Newman E.B., Rosenzweig M.R.* The precedence effect in sound localization // Amer. J. Psychology. 1949. V. 62. P. 315–336.

Проблемы и перспективы построения логики научного знания

А.М. Дорожкин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
dav@entelecom.ru

В современной науке и философии проблема поиска логики роста научного знания и проблема построения некоей формализованной системы, замещающей функции мыслительной деятельности человека, – это две разные проблемы, имеющие, так сказать, разные и собственные «кухни», т. е. разные методологии исследования, разные достигнутые результаты и разную проблематику и соответственно всему этому разные научные коллективы, работающие на этих «кухнях».

Тем не менее, нам представляется, что между этими двумя направлениями есть много общего, начиная с истории. Действительно, в XVII веке Ф. Бэкон, родоначальник индуктивно-эмпирической программы научного поиска, провозглашает, что найдена универсальная методология производства научного знания, до такой степени совершенная, что гениальность становится уделом истории. Ныне, то есть с открытием бэконовской методологии, научные открытия можно планировать. По историческим меркам в это же время появляются изумительные по своему совершенству адроиды, и это дает возможность Ж.О. Ламетри выпустить книгу «Человек-машина», в которой человек представляется посредством системы механических и гидродинамических агрегатов. Таким образом, и тут и там возникают этакие «шапкозакидательские» заявления, смысл которых – и проблема производства, и проблема функционирования человека, в том числе и его мышления, решена.

XIX век в этом плане – век отрезвления. Огюст Конт говорит о возникновении позитивного научного знания, весьма ограниченного в своих возможностях: наука имеет только описательную функцию; объяснение и предсказание не свойственны позитивной науке. В это же время появляется экспериментальная психология, в которой делается вывод о принципиальной невозможности описания психики человека с помощью физических законов. XX век вновь начинается с атаки на возникшие проблемы в этих отраслях знания. Логический позитивизм и сменивший его постпозитивизм уже с большей осторожностью, но все же пытается «нащупать» логику роста научного знания. Осторожность прежде всего проявляется в том, что под научным знанием понимается естествознание, но не гуманитарное. В значительной мере участь гуманитарного знания разделили социальные и математические науки. Однако, несмотря на отмеченное и ряд других ограничений, вера в возможность нахождения логики научного роста все же присутствует в этих программах. Такая же, если не большая, вера в возможность построения искусственного интеллекта наблюдается в различных направлениях кибернетики, возникшей, как известно, после Второй мировой войны. И вновь отрезвление от радужных перспектив: в методологии науки это работы П. Фейерабенда, взращенного позитивизмом, но утверждающего, что никакой логики в процессе приращения научного знания нет и быть не может. Наука развивается, по его мнению, хаотично и неравномерно. Более того, научные знания по своей значимости ничем не отличаются от знаний, допустим, мистических или каких-либо других ненаучных. В кибернетике же к концу XX века дела обстоят не лучше. О такой науке и ее основателе студенты даже не знают. А споры студентов 60–70-х годов сегодняшние ученые и не вспоминают. Технические проекты создания искусственного интеллекта ныне заменены попытками построения формализованных математических моделей функционирования некоторых функциональных свойств человеческого мозга. Говоря проще, технически проблема построения искусственного интеллекта ныне не признается, скорее, неосуществимой, нежели наоборот, но вот теоретические его модели – здесь можно еще что-то сотворить. Автор этих строк ни по каким основаниям не может считать себя специалистом в области построения систем искусственного интеллекта, однако дело в данной области на сегодня представляется ему именно так. Что же касается определенных надежд и перспектив в другой отмеченной здесь области исследований, то, как мы полагаем, можно упомянуть идеи эволюционной эпистемологии. Они также неоднозначно трактуют возможности нахождения логики научного поиска, однако дают формальные возможности ее существования и даже выявления. Однако это разговор особый, и не краткий. Мы же, ввиду краткости отпущенного для изложения идей времени и места, обратимся к вопросу о том, почему прослеживаются исторические параллели в постановке и решении разных проблем. Довольно интересным нам также представляется и вопрос о том, как долго эти параллели будут наблюдаться. Наступит ли момент рассогласования в решении данных проблем? Или же им предначертано быть вместе всегда?

Что касается ранних этапов становления отмеченных выше проблем, то одинаковость их решений объясняется возникающей в то время характерной чертой классической науки, проявляющейся в том, что основной ее задачей считалось сведение кажущейся сложности изучаемого явления к простым математическим и физическим (механическим) законам. В это время ученые пытались объяснить весь мир только с помощью всеобъемлющего формализма. Ярким примером это-

го является хорошо известный демон Лейбница. Другими словами, мышление ученых того времени (кстати, еще во много не разделенное строго по предметным областям), определялось так называемой классической картиной мира. Одинаковость отрезвления XIX века при этом характеризуется невозможностью придуманных формальных конструкций даже не объяснить, а просто описать конкретные факты, ставшие известными и в той и в другой областях.

Гораздо труднее, на наш взгляд, дать объяснение одинаковости возрождения утраченных надежд на решение и проблемы роста научного знания, и проблемы создания искусственного интеллекта в XX веке. Здесь, скорее, следовало бы ожидать расхождения их историй. Мы полагаем, что причиной неожиданного единства явились взгляды раннего Витгенштейна, увлекшегося принципом простоты. Блеск бритвы Оккама на определенное время затмил для Витгенштена критическую компоненту его разума. В дальнейшем он сам будет критиковать эти свои ранние взгляды, но его идеи оказались соблазнительными для логических позитивистов, а отсюда возникла мысль о наличии в обязательном порядке для любого научного направления свойства рациональности, причем ее в классическом понимании. Суть этого понимания проста: рациональность может быть только одного вида, а следовательно, то или иное знание может быть или рациональным, или иррациональным и никак иначе. Эта единственная в своем роде рациональность и обеспечивает одинаковость видения и решения проблем логики роста научного знания и проблем создания искусственного интеллекта. Рациональным, а следовательно, истинно научным следует признавать только такое решение проблем, которое подчиняется строго заданной системе правил. Наподобие игры в шахматы. Это ведь рациональная и даже весьма творческая деятельность. Но творчество ограничено правилами: конь может ходить только так, ладья только так и т. д. А это, в свою очередь, означает, что такую процедуру можно алгоритмизировать. Это и сделано на сегодня и, нужно признать, весьма успешно. Но не только в области решения проблем искусственного интеллекта. И в этой другой области подобные находки мы не признаем успешными. Определенным аналогом этого решения в области методологии науки явились так называемые ТРИЗ – теории решения изобретательских задач. Авторы этих теорий полагают, что они нашли универсальный алгоритм решения задач в области изобретательства. Не нужен технический гений; можно ограничиться знаниями выдвинутой теории и можно планировать решения технических задач. С нашей точки зрения, это весьма и весьма напоминает век XVII и заявления уже упомянутого Ф. Бэкона.

Разумеется, такие представления о рациональности и научности ныне признаются (по крайней мере, в философии науки) архаичными. Сегодня принято говорить о неклассической рациональности, в рамках которой описанная выше рациональность получила название закрытой. Наряду с ней существуют и другие рациональности, и прежде всего рациональность открытого типа, когда деятельность ученого не ограничена системой жестких правил, наподобие шахматных. Исследователь вправе вырабатывать новые шаги поиска, не предписанные наличными правилами. Последние тоже имеют место – совсем без них нельзя – иначе мы получим «игру в крокет» Л. Кэрролла. Но эти правила не выполняют роль жестких регулятивов деятельности, а являются своеобразным изначальным каркасом для будущих теорий и правил. Ныне покойный отечественный философ Э.М. Чудинов выдвинул идею слентов, и нашел, на наш взгляд, очень удачную аллегорию для объяснения ситуации построения новой научной теории. СЛЕНТ – это строительные леса научной теории. Пока она строится, ее окружают леса. Но при завершении строительства леса исчезнут. Они будут разобраны, потому что уже не нужны. При этом построенная в рамках открытой рациональности научная теория имеет иные функции, нежели старая. Новая теория – это не пособие, с помощью которого мы можем безошибочно ответить на вопрос, что будет происходить при тех или иных условиях. Теория не столько отвечает на вопросы, сколько направляет и стимулирует дальнейший поиск. Попросту говоря, теория призвана задавать вопросы и тем самым оставлять рациональность открытой. Мера неопределенности наших знаний в рамках такой рациональности никогда не будет нулевой. Все дело в тенденции к устранению такой неопределенности или к ее расширению. Думается, что возможное расхождение в решении проблем построения логики роста научного знания и проблем нахождения формализмов деятельности мозга определится этими тенденциями. Нынешнее состояние проблемы логики роста науки свидетельствует об увеличении доли неопределенности в ее решении. Какова тенденция решения проблем построения формальных моделей мышления – вопрос для нас остается открытым.

ЭЭГ корреляты спонтанной мыслительной активности и автобиографических воспоминаний

Г.Г. Князев[1], Е.А. Дорошева[1,2], А.Н. Савостьянов[1], А.В. Бочаров[1]

[1]Научно-исследовательский институт физиологии СО РАМН, Новосибирск
[2]Новосибирский государственный университет
elena.dorosheva@mail.ru

Когнитивные процессы, протекающие в периоды относительного покоя, когда мозг не занят переработкой поступающей извне информации и организацией оперативного поведения, составляют значительную часть психической жизни человека и могут определять поведение в долговременной перспективе. В настоящее время известно, что ряд структур головного мозга (обозначенных как дефолт-система мозга [13]) активны вне решения внешне ориентированных задач и устойчиво деактивируются во время большого разнообразия специфического целенаправленного поведения. Активация данных структур происходила при мыслительной деятельности, относящейся к восприятию своей личности [9, 10, 17], во время представления себя в разных ситуациях, представления будущего, воспоминаний о личном прошлом, восприятия того, как о человеке думают другие люди [2], размышлениях на тему отношений с другими людьми и на моральные темы, а также при имитации социальных взаимоотношений [1, 3, 6, 7, 8, 12, 14, 16, 17]. Повышение активности или уменьшение дезактивации данных структур было связано с менее точным выполнением задачи на внимание и систематически предсказывало и предшествовало совершению ошибки [5]. При необходимости включения в оперативную деятельность было показано, что степень снижения активности этих структур пропорциональна сложности задачи [11, 15]. Предполагается, что когнитивные процессы, протекающие, когда мозг не занят решением актуальной внешней задачей, связаны с обдумыванием событий прошлого, планированием, размышлениями о себе и своих взаимоотношениях с другими людьми.

К настоящему моменту подавляющее большинство исследований спонтанной мыслительной активности выполнено с помощью методов позитронно-эмиссионной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии. В то же время использование метода ЭЭГ может дать большее временное разрешение, что важно для изучения трудноуловимых мыслительных процессов.

В настоящей работе приведены предварительные результаты исследования ЭЭГ-коррелятов спонтанной мыслительной активности и автобиографических воспоминаний.

Выборка включала 35 здоровых испытуемых (17 мужчин и 18 женщин; возраст 18–32 года). Запись ЭЭГ проводилась в 128 отведениях, в качестве референта использовались объединенные ушные электроды, расположение электродов картировалось. На первом этапе осуществлялась фоновая запись ЭЭГ поочередно с закрытыми и открытыми глазами, затем испытуемые заполняли опросник, описывающий их состояние и мысли во время записи. Затем во время записи ЭЭГ с закрытыми глазами участники исследования отслеживали возникновение новых мыслей и классифицировали спонтанно приходящие мысли на относящиеся к себе и не относящиеся. После этого испытуемые заполняли аналогичный опросник, дополнительно отмечая основные отличия от первой записи. С помощью опросника выявляли основные состояния и типы активности испытуемого во время записи (выделены с помощью факторного анализа): размышления о своем прошлом и будущем; о своих отношениях со значимыми людьми; полудрема; реакция на внешние стимулы и на внутренние ощущения. На следующем этапе проводилась запись ЭЭГ, состоящая из десяти циклов, в каждом из которых воспоминание какого-либо события из своей жизни чередовалось с выполнением задания на различение высоких и низких звуковых тонов. Участники эксперимента отмечали начало воспоминания (момент, когда событие выбрано) и интенсивное, яркое представление события. В конце каждого эпизода участники исследования оценивали характеристики воспоминания (интенсивность положительных и отрицательных эмоций, четкость представления, важность), указывали примерную удаленность события во времени, а также — было ли оно связано с другими людьми. Затем снова проводилась запись фоновой активности.

Локализация источников ЭЭГ-активности была выполнена в программе sLORETA. С помощью пакета EEGLAB версии 11.0.4.3 и специально написанных «скриптов» ЭЭГ-данные были обработаны от артефактов. Для каждого участника и каждого экспериментального условия была построена модель локализации эквивалентных диполей ЭЭГ-компонентов с использованием функции DIPFIT. Индивидуальная локализация электродов ЭЭГ-записи была выровнена в соответствии с моделью локализации электродов головы, использованной для определения эквивалентных диполей. В анализ были включены лишь те ЭЭГ-компоненты, чьи модели эквивалентного диполя имеют остаточную дисперсию корковых карт не выше 15 % по сравнению с наиболее подходящей проекцией модели эквивалентного диполя на электроды головы. Временно-частотное разложение сигнала производилось с помощью вейвлета преобразования, перекрытие временного окна начи-

налось с 3-цикла вейвлета, при этом число циклов линейно увеличивалось с частотой, достигая половины числа циклов в самой высокой частоте [4]. Подготовка массива данных к кластеризации была проведена оригинальным методом PCA [4]. Достоверность различий во временно-частотном плане была оценена с использованием реализованного в EEGLAB toolbox непараметрического метода bootstrap. Поправка на множественные сравнения делалась с помощью метода контроля ложных эффектов. В качестве достоверных рассматривались только те эффекты, которые оставались достоверными на уровне значимости $p < 0{,}05$ после поправки контроля ложных эффектов.

В дельта- и тета-диапазонах выявлена значимо более высокая спектральная мощность при мыслях, отмеченных испытуемыми как относящиеся к ним и к их взаимоотношениям с другими людьми, чем для мыслей, не относящихся к ним и их взаимоотношениям. В альфа-диапазоне 7–10 Гц спектральная мощность снижалась для мыслей, относящихся к себе и взаимоотношениям с другими, по сравнению с мыслями, не относящимися к себе и отношениям с людьми, в диапазоне 10–14 Гц наблюдался противоположный эффект.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 11-06-00041-А и гранта Президента Российской Федерации № МК-6096.2012.4.

Литература

1. *Buckner R.L., Andrews-Hanna J.R., Schacter J.L.* The Brain's Default Network. Anatomy, Function, and Relevance to Disease // Ann. N. Y. Acad. Sci. 2008. V. 1124. P. 1–38.

2. *Buckner R.L., Carrol D.C.* Self-projection and the brain // Trends in Cognitive Science. 2007. V. 11. P. 49–57.

3. *Decety J., Sommerville J.A.* Shared representations between self and others: A social cognitive neuroscience view // Trends in Cognitive Sciences. 2003. V. 7. P. 527–533.

4. *Delorme A., Makeig S.* EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis // J. Neuroscience Methods. 2004. V. 134, № 1. P. 9–21.

5. *Eichele T., Calhoun V.D., Moosmann M., Specht K., Jongsma M.L., Quiroga R.Q., Nordby H., Hugdahl K.* Unmixing concurrent EEG-fMRI with parallel independent component analysis // Int. J. Psychophysiol. 2008. V. 67. P. 222–234.

6. *Gallagher H.L., Frith C.D.* Functional imaging of theory of Mind // Trends in Cognitive Sciences. 2003. V. 7. P. 91–96.

7. *Greene J.D., Sommerville R.B., Nystrom L.E., Darley J.M., Cohen J.D.* An fMRI investigation of emotional engagement in moral judgment // Science. 2001. V. 293. P. 2105–2108.

8. *Greicius M.D., Krasnow B., Reiss A.L., Menon V.* Functional connectivity in the resting brain: a network analysis of the default mode hypothesis // Neuroscience. 2003. V. 100, № 1. P. 253–258.

9. *Gusnard D.A., Akbudak E., Shulman G.L., Raichle M.E.* Medial refrontal cortex and self-referential mental activity: relation to a default mode of brain function // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2001.V. 98. P. 4259–4264.

10. *Kelley W.M., Macrae C.N., Wyland C.L., Caglar S., Inati S., Heatherton T.F.* Finding the self? An event-related fMRI study // J. Cognitive Neuroscience. 2002. № 14. P. 785–794.

11. *McKiernan K.A., D'Angelo B.R., Kaufman J.N., Binder J.R.* Interrupting the «stream of consciousness»: An fMRI investigation // NeuroImage. 2006. V. 29. P. 1185–1191.

12. *Northoff G.* Neuroscience of decision making and informed consent: An investigation in euroethics // Journal of Medical Ethics. 2006. V. 32, № 2. P. 70–73.

13. *Raichle M.E., MacLeod A.M., Snyder A.Z., Powers W.J., Gusnard D.A., Shulman G.L.* A default mode of brain function // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2001. V. 98, № 2. P. 676–682.

14. *Rilling J.K., Goldsmith D.R., Glenn A.L., Meeta R., Jairama M.R., Elfenbein H.A., Dagenais J.E., Murdock C.D., Pagnoni G., Fawcett S.* The neural correlates of the affective response to unreciprocated cooperation // Neuropsychologia. 2008. V. 46. P. 1256–1266.

15. *Schacter D.L., Addis D.R., Buckner R.L.* Episodic simulation of future events: concepts, data, and applications // Ann. N. Y. Acad. Sci. 2008. V. 1124. P. 39–60.

16. *Singh K.D., Fawcett I.P.* Transient and linearly graded deactivation of the human default-mode network by a visual detection task // NeuroImage. 2008. V. 41, №1. P. 100–112.

17. *Vogeley K., May M., Ritzl A., Falkai P., Zilles K., Fink G.R.* Neural correlates of first-person-perspective as one constituent of human selfconsciousness // J. Cognitive Neuroscience. 2004. V. 16. P. 817–827.

Понимание механизмов понимания: перспективы ближайшего будущего

В.Л. Дунин-Барковский

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва
Лаборатория обратного конструирования мозга им. Д. Марра
http://rebrain.2045.ru

Системы искусственного интеллекта и исследования механизмов мозга имеют сегодня настолько существенные результаты, что могут в ближайшем будущем перевести задачу функционально полного понимания механизмов мозга и их искусственного воспроизведения в плоскость практической реализации. Судя по многим признакам, возможность появления у человека разумных партнеров техногенного происхождения реальна в пределах текущего десятилетия.

Наша группа, Лаборатория обратного конструирования мозга имени Дэвида Марра, ставит задачу в срок до января 2016 г. подготовить описание известных или весьма вероятных и технологически реализуемых механизмов работы мозга человека. Предполагается, что полученное нами описание можно будет непосредственно использовать для создания искусственной модели мозга человека.

Мы осваиваем все, что о мозге написано, стараемся это понять, частично смоделировать на компьютерах и переписать с единой точки зрения. Подобной задачей сейчас в мире занимаются десятки (если не сотни) исследовательских групп. Мы не уступаем им в профессионализме, но, в отличие от большинства наших коллег, мы серьезно рассчитываем на скорое получение решающих результатов. В данном сообщении в очень эскизной форме излагаются представления о работе мозга человека, как они видятся нам сегодня.

Мозг получает информацию о мире через сенсорные каналы и воздействует на мир, используя эффекторные каналы. Текущая информация о мире представлена активностью конкретных нейронных групп, колонок коры больших полушарий головного мозга. Общие характеристики текущей информации записываются в «летопись текущих событий» в гиппокампе. Отображение текущей информации осуществляется с учетом уже накопленной мозгом информации. Иными словами, процесс отображения текущей информации в мозге сопряжен с модификацией устройств мозга, участвующих в отображении информации. Результаты этой модификации составляют основу памяти нервной системы.

Восприятие текущей информации нервной системой сопряжено с постоянной проверкой правильности предсказания текущего сенсорного входа на основании анализа накопленного опыта и сенсорного входа в моменты, предшествующие текущему моменту.

Из бесконечного континуума окружающего мира мозг выделяет дискреты восприятия («образы элементов мира»), местоположение и другие параметры (состояние) которых (т. е. элементов) он постоянно предсказывает и отслеживает. Элементы мира и их образы могут быть «фазическими» (т. е. преходящими) и тоническими (т. е. не исчезающими сами по себе, существующими до тех пор, пока они не разрушены). Для современных людей, в отличие от других приматов, существенно, что значительная часть элементов мира (объектов-прообразов (или источников) образов элементов мира) антропогенна, т. е. создана самим обладателем мозга или другими людьми. Среди антропогенных элементов особую роль играют элементы речи. Одна из сторон, обеспечивающая особую роль элементов речи, состоит в их обилии. Согласно известной метафоре, с появлением языка мир для людей удвоился, так как появился «языковый дубликат мира».

Наряду с другими антропогенными объектами язык (т. е. совокупность элементов языка и практика их употребления) используется людьми повсеместно и перманентно. Как антропогенное явление язык обладает уникальными свойствами. Язык, во-первых, явление социальное. Происхождение языка (так же, как и происхождение жизни) неизвестно. Он получается людьми от других людей и используется людьми для взаимодействия друг с другом. В то же время язык постоянно применяется человеком индивидуально, в обращениях к самому себе, в планировании деятельности. Последнее означает, что язык употребляется людьми в процессах мышления. Слово «мышление», как и большинство «основных» слов языка, не имеет формального определения и взывает больше к интуиции индивидуума, чем к каким-то четко очерченным рамкам понятий. С точки зрения автора, мышление – это множество последовательностей автономного представления в мозгу человека элементов мира и их связей. «Отдельная мысль» представляет собой цепочку (последовательность переходов), ведущую от (образа) начального (для конкретной мысли) элемента мира к (образу) конечному (для данной мысли) элементу мира по существующим в мозгу связям между образами этих элементов мира. Блестящий пример модели мышления (у мыши) дается в недавней статье Хопфилда [1]. Представляется несомненным, что процессы мышления у особей, не имеющих языка, ограничивались мысленным прокладыванием маршрутов в пространстве и анализом межиндивидуумных отношений. Интересно, что если в представлении физического пространства перейти от идеи картирования к идее взаимодействующих

агентов мест [2], то решение проблем межличностных отношений может оказаться подобным решению проблем навигации. С появлением элементов языка, которые тоже могут фигурировать в процессах мышления наряду с образами других элементов мира, класс задач, доступных для решения путем мышления, кардинально расширился.

Элементы мира могут быть разной степени сложности. Среди объектов есть, например, деревья и листья, леса и реки, конечности и целые животные, особи одного с индивидуумом вида и особи других видов и т. д. Чисто логически мы пришли к гипотезе так сказать «над-афферентной высоты» каждого конкретного нейронного образа элемента мира. Эта «высота» представляет собой «расстояние» нейронного представления элемента мира от «ближайшего сенсорного входа». Естественно думать, что у языкоспособных видов (у человека!) доступная высота нейронных образов элементов мира существенно превосходит доступную высоту образов элементов мира неязыкоспособных видов. То есть можно полагать, что для образов таких элементов мира, как слова естественных языков, нужна большая высота нейронных образов. Именно способность человеческого мозга создавать нейронные образы большой высоты позволяет людям овладевать и пользоваться языком, созданным, очевидно, нашими предками.

Помимо информационного отображения текущего состояния мира в мозгу представляются оценочные и эмоциональные характеристики текущего состояния субъекта во внешнем мире (хорошо, плохо, комфортно, дискомфортно и т. д.), а также прогноз значений этих параметров и сравнение прогноза с фактическими величинами. Многочисленные исследования последних десятилетий показывают, что система оценки этих параметров и их использования для формирования стратегий поведения тесно связана с базальными ганглиями – комплексом нейронных структур, расположенным вблизи от коры головного мозга. Класс явлений этого рода известен как обучение с подкреплением. Следует сказать несколько слов по поводу данного типа обучения. Его наличие позволяет решать, например, следующий большой класс задач, постоянно решаемых человеком. В качестве примера, рассмотрим проблему разбиения бивуака у туриста. Для устройства бивуака нужно осуществить очень большую последовательность действий, включающих более десятка конкретных выборов из нескольких альтернатив. Скажем, сначала надо решить, отправиться в поход или нет. Потом решить, куда и с кем отправиться, потом... и т. д., включая выбор места для палатки и способа установки палатки. Каждое из последовательных действий может иметь несколько альтернатив. Причем надо решить, какая из альтернатив удовлетворительна. Если, например, вероятность удовлетворительности альтернатив конкретного действия 1/3, то при случайном выборе турист сможет разбить палатку успешно с вероятностью не больше $(1/3)^{10}$. Казалось бы, что для того, чтобы найти успешное решение задачи требуется провести около $3^{10} = 59049$ испытаний разных возможностей. Однако, если каждую из альтернатив «отрабатывать» по отдельности, пусть даже потратив на каждую 100 попыток, то общее число испытаний для достижения конечного успешного поведения составит 1000, что на два порядка меньше.

Вместе с полушариями мозга пропорционально быстро в эволюции увеличивались размеры мозжечка. Начиная с работ Дж. Бриндли [3] и Д. Марра [4], возникло представление о том, что мозжечок представляет огромную совокупность «простых персептронов». Это представление сейчас развито и детализировано настолько, что функцию мозжечка делает в основном понятной [5]. На этом месте нужно, правда, подчеркнуть, что мозжечок выполняет важнейшие, но удаленные как от непосредственного моторного управления, так и от сенсорных входов и от мозговых центров принятия решений функции. Нам в имитационных экспериментах с моделями мозжечка удалось прояснить, например, возможные механизмы включения мозжечка в управление движениями глаз.

Нам удалось сформировать комплекс представлений об основных механизмах работы колонки коры головного мозга. В коре больших полушарий человека от 500 000 до 1 000 000 колонок. Прежде всего, основные связи между основными элементами нейронной колонки должны быть врожденными. То есть они должны быть сформированы за счет генетических маркеров без влияния электрической активности. Общая структура внешних связей колонки также должна быть врожденной. На врожденный «скелет» связей накладываются их позднейшие модификации. Существование врожденных связей приводит к тому, что во множестве устойчивых состояний нейронов колонки существует модель определенных топологических типов. Наиболее важными нам представляются топологии: 1) изолированных точек (как в модели Хопфилда с взаимно-случайным набором образующих векторов). Мы будем называть такие сети сетями с нуль-мерными аттракторами; 2) одномерных цепочек; 3) двухмерных решеток; 4) трехмерных решеток. В компьютерной модели мы построили примеры сетей с одномерными аттракторами с числом устойчивых состояний порядка одного миллиона (при числе нейронов $N = 10\,000$) [6]. Такое же число состояний могут иметь сети с «размерностью аттракторов» d = 0, 2 и 3. За счет изменяемых связей с другими колонками или сенсорными входами колонки нейронов могут либо осуществлять операции типа выделения первых главных компонент (по механизму самоорганизующихся карт Кохонена), либо кластеризовать входную информацию. В случае преобразований первого типа может использоваться непосредственное соединение предшествующей с последующей колонок нейронов. При кластеризующих соединениях возникает необходимость в ортогонализации выходных сигналов предшествующей сети перед их поступлением на последующую сеть. Параметры кластеризации могут быть адаптивно настроены, если имеется

возможность «переподавать» плохо обработанные нервной системой сигналы в моменты отключения сенсорных входов. Этот механизм предположил в свое время Дэвид Марр. Имеется много современных данных, подтверждающих использование подобного механизма в реальных нервных системах [7]. Для предсказания событий и сигналов и его настройки существенна возможность передавать сигналы в нейронных колонках как в «прямом» направлении (в направлении удаления от сенсорных входов), так и в обратном направлении. Направления передачи информации могут регулироваться сигналами нижней части частотных спектров нейронной активности (частотами альфаритма и более низкими). «Узнавание» сигналов устойчивыми состояниями нейронной сети (точками аттракторов) может получить существенную помехозащищенность благодаря коллективным эффектам [8].

Работа поддерживалась Общественным движением «Россия-2045» и грантом РФФИ № 13-07-01004.

Литература

1. *Hopfield J.J.* Neurodynamics of mental exploration // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2010. V. 107, № 4. P. 1648–53.

2. *Conradt J.* A Distributed Cognitive Map for Spatial Navigation : PhD Thesis / Institute of Neuroinformatics. Zurich, 2008. 209 p.

3. *Brindley G.S.* The use made by the cerebellum of the information that it receives from sense jrgans // IBRO Bull. 1964. V. 3. P. 80.

4. *Marr D.* A theory of cerebellar cortex // J. Physiol. 1969. V. 202, № 2. P. 437–70.

5. *Dunin-Barkowski W.L., Flerov Yu.A , Vyshinsky L.L.* Prognosis of Dynamical Systems Behavior Based on Cerebellar Type Neural Technologies // Optical Memory and Neural Networks. 2011. V. 20. P. 2091–2121.

6. *Solovyeva K.P.* Bump-Attractor Based Self-Organized Maps // Dynamical Neuroscience XX. Collective Cognition: The Neurophysiology of Social Neuroscience // A Satellite Symposium Immediately Preceding the 42nd Annual Meeting of the Society for Neuroscience. Bethesda, USA : National Institute of Health, 2012. P. 37.

7. *Rolls E.T., Deco G.* The Noisy Brain: Stochastic Dynamics as a Principle of Brain Function. Oxford : Oxford University Press, 2010. URL: http://www.oxcns.org/b9_text.ntml.

8. *Karandashev I.M.* Attractor-Based Perceptrons // Dynamical Neuroscience XX. Collective Cognition: The Neurophysiology of Social Neuroscience : A Satellite Symposium Immediately Preceding the 42nd Annual Meeting of the Society for Neuroscience. Bethesda, USA : National Institute of Health, 2012. P. 29.

Компьютерный детектор ошибок как гомеостатический регулятор деятельности

П.П. Дьячук, И.В. Шадрин, Д.А. Логинов

Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева
ppdyachuk@rambler.ru

Одним из важных факторов жизнедеятельности человека являются ошибочные действия, которые он совершает, решая те или иные проблемы, стоящие перед ним. В 1968 году Н.П. Бехтерева открыла важную функцию мозга, которая получила название «детектор ошибок» [1]. Детектор ошибок является мозговым механизмом оптимизации мыслительной деятельности. Физиологически детектор ошибок контролирует правильность выполнения стереотипов в деятельности человека. Естественно взять в качестве одного из параметров жизнедеятельности человека число совершаемых ошибок. Н.П. Бехтерева указывает, что «детектор ошибок – это такой механизм в мозге, который при отклонении от нормы поддерживает стандарт поведения». Принцип работы детектора ошибок противоречит принципу творчества, которое призвано ломать стереотипы, но в то же время детектор ошибок «охраняет творчество от использования большого количества старого, уже созданного ранее и от того, чтобы результат творчества не использовался во вред, хотя полностью от этого застраховать невозможно» [1]. Как утверждает Н.П. Бехтерева, «…можно с помощью коррекции детектора ошибок заставить большее количество детей заниматься творчеством».

«Дело в том, что в мозге есть места скопления детектора ошибок», которые при развитии творчества начинают с той же силой поддерживать творчество, с которой ранее поддерживали стереотипы поведения. Методы обучения должны стимулировать появление детекторов ошибок, которые стали бы детерминаторами творчества» [1]. То есть детекторы ошибок поддерживали стереотипы в поведении учащихся, а затем перестроились и стали поддерживать состояние творчества. Детекторы ошибок надо перепрофилировать. Как пишет Н.П. Бехтерева, «детектору, в принципе, все равно, что поддерживать. Была бы матрица, а он ее будет поддерживать...» Например, он поддерживает наркоманию потому, что считает ее нормой. Точно также он будет поддерживать творчество, считая его нормой. Важно, чтобы целью обучения в средней школе было воспитание и обучение не потребителя, а творческой личности.

Компьютерный симулятор детектора ошибок мозга моделируется гомеостатической системой управлений деятельностью, которая основана на регулировании числа совершаемых человеком ошибок.

Научение решению задач можно рассматривать как процесс самоорганизации учебной деятельности. Как показано в [2], получение новой информации о способах и стратегии решения задач обусловлено бифуркацией деятельности обучающегося, возникающей вследствие изменения неопределенности проблемной среды. Проблемная среда – это совокупность условий, выполнение которых необходимо и достаточно для научения решению задач. В качестве таких условий можно выделить: 1) множество возможных действий или операций, необходимых для выполнения деятельности по решению задачи; 2) рабочее поле или пространство состояний решения задачи, в котором совершаются действия по поиску решения задачи; 3) наличие генератора последовательности аналогичных задач; 4) наличие адаптера – механизма местной обратной связь, позволяющей: а) получать обучающемуся информацию о полезности совершаемых действий для решения текущей задачи; б) отменять или ликвидировать неправильные действия, совершенные в моменты выхода за пределы гомеостаза числа ошибок; 5) наличие «бифуркатора» – главной обратной связи, регулирующей величину гомеостаза числа ошибок.

Особую роль при взаимодействии обучающегося с проблемной средой играет развитие структуры учебной деятельности обучающегося, регулируемое с помощью механизмов обратной связи. Основой функционирования главной и местной обратных связей являются исполнительные механизмы, не просто преобразующие интерфейс проблемной среды, а изменяющие активным образом текущее состояние решения задачи путем отмены или исправления неправильных действий. При этом взаимодействие между системой управления и обучающимся имеет бинарный характер [3].

Гомеостатическая система управления деятельностью представляет собой компьютерный симулятор детектора ошибок мозга, который регулирует число совершаемых человеком ошибок и поддерживает правильное поведение человека, состоящее в безошибочном решении задач. Предлагаемый компьютерный симулятор детектора ошибок контролирует гомеостатический параметр – число ошибок. Если значение гомеостатического параметра выходит за пределы гомеостаза числа ошибок, то подключается регулятор, который ликвидирует ошибку. Например, в системе компьютерного «поводыря» учебных действий, представленного в работе [4], гомеостаз числа ошибок равен нулю, поэтому компьютерная система управления ликвидирует или отменяет каждую совершенную ошибку.

Теоретический анализ

Для определения величины гомеостаза числа ошибочных действий ΔL после завершения решения очередной задачи вычислительный модуль системы управлений вычисляет относительную частоту правильных действий p и находит гомеостатический интервал числа ошибок

$$\Delta L = \mathrm{INT}(\frac{0.5}{1-p}) - 1, \qquad (1)$$

где $1 \geq p \geq 0.5$ – относительная частота правильных действий.

При $\frac{i}{i+1} \leq p < \frac{i+2}{i+3}$ $i = 2*n-1$, $n = 1,2,3,...$ Так, при $\frac{1}{2} \leq p < \frac{3}{4}$ $\Delta L = 0$, номер уровня самостоятельности обучающегося $n = 1$, соответственно при $\frac{3}{4} \leq p < \frac{5}{6}$ $\Delta L = 1$ и номер уровня самостоятельности обучающегося $n = 2$ и т. д.

В системе гомеостатического управления учебной деятельностью информационные управляющие воздействия представлены индикатором мотивационного (отображение изменений функции самостоятельности учебной деятельности обучающегося с помощью дискретной системы уровней самостоятельности учебной деятельности) управления учебной деятельностью, а также действиями по отмене неправильных действий обучающегося, если совершенная ошибка выйдет за пределы гомеостаза ΔL ошибок. Если число неправильных действий превышает интервал допустимых значений числа ошибок, то «гомеостатический» регулятор отменяет или «ликвидирует» неправильные действия. Индивидуальные способности обучающихся влияют лишь на процесс поиска решения задачи, но не на результат. Такая система управляет самоорганизацией или саморазвитием деятельности обучающегося на основе «гомеостатического» регулятора ошибочных действий обучающегося, который выполняет функцию симулятора детектора ошибок мозга.

«Гомеостатический» регулятор учебной деятельности создает для обучающегося условия, позволяющие ему реализовать поисковую активность в процессе поиска решения задач с помощью некоторого набора доступных действий. Цель функционирования регулятора состоит в том, чтобы привести структуру деятельности обучающегося – набор осуществляемых им действий и их последовательность – в такое состояние, когда каждое совершаемое действие будет приближать решение задачи. Для достижения этой цели регулятор поощряет правильные действия и угнетает неправильные. Структурная схема «гомеостатического» регулятора учебной деятельности представлена на рис. 1.

Регулятор производит поиск такого требуемого значения параметров местной обратной связи (аргументов передаточной функции звена *6*, реализующего эту связь), при котором структура учебной деятельности $z(t)$ обучающегося *8* будет соответствовать целям функционирования регулятора $g(t)$. Проверка этого соответствия осуществляется в цепи главной обратной связи в моменты срабатывания переключателя *9*, когда включается звено *10*, определяющее параметры структуры учебной деятельности обучающегося на основе сохраненной во внешней памяти *11* последовательности действий.

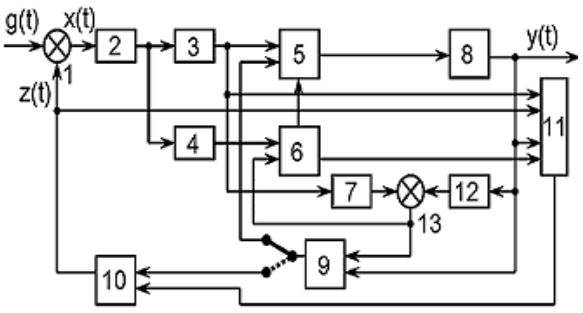


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического управления учебной деятельностью с «гомеостатическим» регулированием количества ошибочных действий

При этом истинные законы изменения параметров структуры учебной деятельности обучающегося $z(t)$ установить невозможно в силу объективных причин, зависящих от психических, физиологических, интеллектуальных и других индивидуальных особенностей человека.

Элемент сравнения *1* производит вычитание $x(t) = g(t) - z(t)$ и тем самым определяет рассогласование между реальной структурой учебной деятельности обучающегося $z(t)$ и требуемой $g(t)$ – исключающей неправильные действия. На основании вычисленной ошибки $x(t)$ звено 2 определяет уровень деятельности обучающегося L_i, где i – номер очередного формируемого звеном *3* задания – новой задачной (проблемной) ситуации. L_i дискретно изменяется во времени (после выполнения очередного задания) и определяется лишь параметрами структуры учебной деятельности обучающегося при выполнении предыдущего $(i-1)$ задания. $L_i = 1$.

Уровень самостоятельности учебной деятельности отображается специальным датчиком в интерфейсе проблемной среды. В зависимости от значения уровня самостоятельности учебной деятельности звено *4* определяет параметры функционирования местной обратной связи *6*. Модуль, включающий звенья под номерами *2* и *4*, является устройством, которое инициирует состояние неустойчивости в деятельности обучающегося. С неустойчивостью связано состояние бифуркации, ветвления в результате которого обучающийся может пойти либо по пути регресса (распада структуры системы действий и появлению многочисленных ошибок), либо по пути прогресса (развития структуры системы действий). Поэтому мы

назвали этот модуль бифуркатором по аналогии с адаптером. Сформированная звеном *3* задача отображается интерфейсом проблемной среды, приведенным модулем *5* в состояние, соответствующее начальным параметрам. Элемент памяти *7* сохраняет тот же набор параметров, но содержащий значения, достижение которых соответствует решению поставленной задачи. Преобразование объектов проблемной среды для достижения этого соответствия является для обучающегося локальной целью, которую он должен достичь, используя систему действий, доступных ему в проблемной среде. Кроме того, модуль *5* реализует все изменения интерфейса проблемной среды, связанные с действиями обучающегося. При этом формирование новой задачной ситуации (формирование соответствующего состояния интерфейса) происходит лишь в моменты включения главной обратной связи, а текущие изменения отображаются после каждого совершенного обучающимся действия.

Для реализации местной обратной связи после каждого действия обучающегося вычислительное звено *12* определяет изменение параметров объектов проблемной среды, а элемент сравнения *13* определяет рассогласование между текущей обстановкой и значениями, сохраненными звеном *7*. Модуль, включающий звенья *7, 12, 13*, выполняет функцию адаптера – устройства, содействующего адаптации обучающегося к деятельности по поиску решения задачи в условиях, определяемых бифуркатором. Величина этого рассогласования, выраженная в количестве дискретных шагов (каждый из которых – это конкретное неправильное действие обучающегося, дискретно изменяющее определенный параметр проблемной среды), определяет отклонение от оптимальной траектории учебной деятельности. Эта информация, составляющая основу местной обратной связи, позволяет обучающемуся совершать ошибки до тех пор, пока их число не выйдет за пределы гомеостаза. При превышении гомеостаза ошибок включается конечный автомат ликвидации ошибок, который отменяет неправильное действие, возвращая тем самым число ошибок в область допустимых значений (см. рис. 2). В моменты времени, когда обучающийся достигает целевого состояния, переключатель *9* может изменить свое состояние при поступлении от обучающегося сигнала об окончании выполнения задания. Если такого сигнала не поступает, регулятор продолжает функционировать по малому кругу чрез местную обратную связь. И напротив, если целевое состояние не достигнуто, переключатель *9* не изменит своего состояния при поступлении этого сигнала.

Изменение состояния переключателя *9* включает контур главной обратной связи, в который включено звено *10*, определяющее параметры структуры учебной деятельности обучающегося на основе формализованной информации, сохраненной в модуле внешней памяти *11*. Отметим, что при формировании очередной проблемной ситуации вновь возникает рассогласование в элементе сравнения *13* и переключатель *9* переходит в состояние, когда сигналы проходят по контуру местной обратной связи и регулируют процесс поиска обучающимся решения текущей задачи.

Во внешней памяти сохраняется не только последовательность действий обучающегося с указанием затраченного времени, но и управляющие воздействия гомеостатического регулятора: условия поставленной задачи, параметры работы датчика «гомеостатический регулятор», параметры структуры учебной деятельности обучающегося. Благодаря этой информации появляется возможность более сложного анализа деятельности обучающегося в любое удобное для исследователя время с применением различных методов и программных средств.

Приведенное описание показывает, что «гомеостатический» регулятор производит поиск такого режима работы местной обратной связи, при котором деятельность обучающегося наиболее эффективна. Учитывая, что истинные законы изменения параметров структуры учебной деятельности обучающегося установить невозможно, «гомеостатический» регулятор количества неправильных действий можно определить как экстремальную самонастраивающуюся систему автоматического управления дискретного действия.

Структура учебной деятельности обучающегося в проблемной среде имеет сложный вид в силу разнообразия семантического смысла действий и порядка их выполнения. Однако если учитывать только синтаксическое значение данных о действиях обучающегося, то множество действий можно разделить на два подмножества: подмножество правильных действий (приближающих решение задачи) и подмножество неправильных действий (отдаляющих решение). Таким образом, деятельность можно формально представить в виде последовательности единиц и нулей – 1110110011…, т. е. в виде сообщения обучающегося (в синтаксической форме), характеризующего структуру системы его действий. В процессе научения решению задач доля правильных действий возрастает, соответственно доля неправильных действий уменьшается.

Гомеостатическое управление носит активный характер, проявляющийся в активном регулировании числа ошибочных действий в случае выхода этого числа за пределы области допустимых значений. Следуя [5], возьмем в качестве показателя эффективности функционирования обучающегося в проблемной среде при выполнении *i*-го задания суммарный коэффициент обратной связи

$$R_i^T = \frac{1}{1+\Delta L^{i-1}}\left(P_A^{i-1}\cdot P_B^{i-1} + P_A^{i-1}\right), \qquad (2)$$

где $P_A^{i-1} = \frac{N_1^{i-1}}{N_0^{i-1}}$ – доля неправильных действий (N_1 – количество неправильных действий; N_0 – общее количество действий); P_B^{i-1} – относительная частота выхода параметра гомеостаза за область его допустимых значений.

Экспериментальная часть

«Гомеостатическое» регулирование ошибочных действий создает для обучающегося условия, позволяющие ему реализовать поисковую активность в процессе поиска решения задач с помощью некоторого набора доступных действий.

Постоянно, пока обучающийся не решит задачу (и не научится решать задачи данного типа), проблемная среда будет подключать датчик «гомеостаза» учебной деятельности. Жизненно важный параметр регулирования представляет собой число ошибочных действий k. «Гомеостатический» интервал ΔL допустимых значений параметра k задается произвольно.

В приведенном на рис. 2 примере число ошибочный действий равен 3. Выход величины k за пределы интервала ΔL включают исполнительные механизмы регулятора, которые отменяют (или «ликвидируют») $k = \Delta L + 1$ неправильное действие.

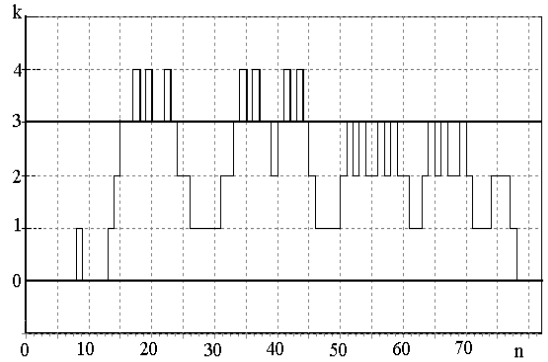


Рис. 2. «Гомеостатическая» зависимость количества ошибок k от номера действия

Из рис. 2 видно, что вертикальные отрезки толстой линии, возвращающие графики в «гомеостаз», отображают действия «ликвидатора», отменяющего неправильное действие, выходящее за пределы «гомеостаза». Надо отметить, что зависимость k от номера действия n получена для третьего уровня самостоятельности.

На рис. 3 приведен график траектории деятельности человека и гомеостатического регулятора, соответствующий графику гомеостатической кривой на рис. 2. Действия «гомеостатического» регулятора показаны жирными вертикальными отрезками.

Обучающийся повторяет конструирование звукового объекта до тех пор, пока его деятельность не станет безошибочной. При выполнении первого задания обучающийся осуществляет конструирование, незамедлительно получая информацию о правильности или неправильности каждого действия. По мере повышения уровня самостоятельности частота подключения «ликвидатора» уменьшается из-за увеличения гомеостаза числа ошибок.

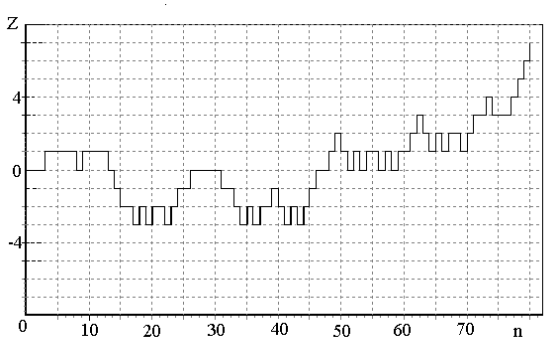


Рис. 3. Траектория деятельности z обучающегося конструированию музыкального объекта из фрагментов

Выводы

Целью функционирования «гомеостатического» регулятора учебной деятельности является достижение суммарным коэффициентом обратной связи нулевого значения. Это означает, что процесс самоорганизации учебной деятельности [6] по конструированию музыкальных пазлов завершился и личности стала суверенной, а действия обучающегося контролируются только собственным детектором ошибок.

Мера рассогласования между требуемой и реальной деятельностью обучающегося – значение уровня самостоятельности учебной деятельности – представлена в проблемной среде дискретным датчиком, отображающим систему уровней в диапазоне от 1 до 10.

Литература

1. *Бехтерева Н.П.* Человек должен ставить себе сверхзадачи // Времена. 2005. № 15.

2. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информатика. Динамическая теория информации. Изд. 2-е, испр., доп. М. : УРСС, 2004.

3. *Дьячук П.П., Бортновский С.В., Дьячук П.П. (мл).* Результативность бинарного и полубинарного взаимодействия обучающегося с виртуальной проблемной средой // Образовательные технологии и общество (Educational Technology & Society). 2013. Т. 16, № 1. С. 482–499.

4. *Дьячук П.П., Пустовалов Л.В., Суровцев В.М.* Система управления поиском решения алгоритмических задач // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3.2 (33). С. 258–263.

5. *Светлов В.А.* Введение в единую теорию анализа и разрешения конфликтов. М. : ЛИБРОКОМ, 2012. 304 с.

6. *Дьячук П.П., Лариков Е.В.* Постнеклассическая парадигма диагностики учебной деятельности // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В.П. Астафьева. 2013. № 1. С. 103–110.

Вариабельность состояния параметров функциональных систем организма человека на примере непроизвольных и произвольных движений человека

В.М. Еськов, А.А. Хадарцев, Т.В. Гавриленко, С.Н. Ватамова

Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, Сургут
karmacurator@mail.ru

При оценке состояния функциональных систем организма (ФСО) человека в современной медицине практически повсеместно используются усредненные или мгновенные значения показателей ФСО. При этом патогенез определяется, исходя из отклонения значений параметров вектора состояния человека от некоторых установленных среднестатистических значений показателей, определенных для условного нормогенеза. Теория хаоса-самоорганизации постулирует уникальность каждой биологической динамической системы и принципиальную невоспроизводимость результатов экспериментов [1]. Встречается ситуация, когда использование хорошо известных методик лечения или других воздействий на человека дает непредсказуемый результат. Например, использование микродоз лекарственных препаратов может давать такой же эффект, как и при использовании обычных дозировок лекарственных препаратов или попытка нормализовать тот или иной показатель приводит к выходу за пределы нормы других показателей. До сих пор можно встретить вариант, когда осуществляется подбор терапии методом точечного воздействия на конкретный показатель ВСОЧ или методом проб и ошибок (т. е. изменение терапии при отсутствии положительной динамики).

Целью настоящей работы является создание персонифицированной оценки состояния параметров ФСО человека путем моделирования индивидуальных показателей постурального тремора, основанной на теории хаоса-самоорганизации и методах теоретико-множественного анализа, многомерных фазовых пространств [2, 4].

Для получения исходных данных использовался разработанный в НИИ БМК при СурГУ бесконтактный способ регистрации тремора (непроизвольные движения конечности человека) и теппинга (произвольные движения конечности человека) биоизмерительным комплексом (БИК). БИК состоит из блока датчиков, блока преобразователей, аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В качестве измерительного устройства применяются датчики токовихревого типа. Анализ зарегистрированных данных проводился на ЭВМ с помощью специализированной программы по временным и спектральным характеристикам кинематограмм/треморограмм (запись положения конечности в пространственных координатах) у испытуемых [2–3]. Программа базируется на общих методах теории хаоса-самоорганизации.

Для решения задачи по созданию персонифицированной оценки состояния параметров ФСО человека на примере нервно-мышечной системы использовались традиционные амплитудно-частотные характеристики зарегистрированных кинематограмм, методы теоретико-множественного анализа и методы многомерных фазовых пространств в рамках теории хаоса-самоорганизации.

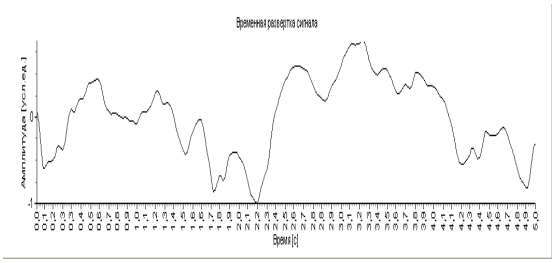
Если определить вектор состояния организма человека (ВСОЧ) для некоторого *q*-го пациента как $\overline{X_j^q} = \{x_{j1}^q, x_{j2}^q, ..., x_{ji}^q, ..., x_{jm}^q\}$ ($m \in N$ и N – множество натуральных чисел, m – количество регистрируемых диагностических признаков (размерность фазового пространства), $i, j \in N$, j – номер измерения ВСОЧ, $i = \overline{1,m}$), тогда нормогенез можно определить, исходя из следующего соотношения: $x_{ji}^q \in X_i^H = [x_{i\min}^H, x_{i\max}^H]$ ($i = \overline{1,m}$), где $X_i^H = [x_{i\min}^H, x_{i\max}^H]$ – интервал значений *m*-го показателя ВСОЧ для некоторого «усредненного» человека в нормогенезе (*H* – норма). Отклонение значений показателей ВСОЧ от $X_i^H = [x_{i\min}^H, x_{i\max}^H]$, т. е. $x_{ji}^q \notin X_i^H = [x_{i\min}^H, x_{i\max}^H]$ свидетельствует об отклонении от нормогенеза и переход в патогенез.

Но всегда ли должно выполняться соотношение $x_{ji}^q \in X_i^H = [x_{i\min}^H, x_{i\max}^H]$ для определения нормогенеза человека? Организм человека остается наиболее сложной системой, и определить нормогенез каждого человека путем вхождения значений его параметров ВСОЧ в некоторые усредненные значения показателей не всегда корректно. Любая биологическая система непрерывно изменяется под влиянием внутренних процессов и внешних воздействий, и поэтому отдельные ее составляющие находятся в режиме непрерывного «мерцания», т. е. объективные показатели состояния ВСОЧ непрерывно изменяются. Любой диагностический признак ВСОЧ является функцией времени $x_{ji}^q = x_{ji}^q(t)$ и в различные моменты времени принимает различные значения $x_{ji}^q(t_1) \neq x_{ji}^q(t_2)$, естественно, что в какие-то моменты времени мы можем получить и $x_{ji}^q(t_1) = x_{ji}^q(t_2)$, но в общем случае для любого признака ВСОЧ $dx/dt \neq 0$, где x – вектор состояния, который мы измеряем в дискретные моменты времени t. Для тремора и теппинга $x(t)$ – непрерывная функция. Особенно ярко это проявляется при изучении таких показателей ВСОЧ, как

электроэнцефалограмма, электрокардиограмма, треморограмма и т. д. Эти показатели обладают высокой объективностью, так как демонстрируют динамику поведения параметров ВСОЧ во времени и имеют высокую диагностическую ценность. Но при более детальном рассмотрении этих показателей оказывается, что во времени изменяются не только значения самих показателей, но и внутренняя структура сигнала (амплитудно-частотная характеристика) регистрируемых показателей.

На рисунках 1, 2 приведены примеры регистрации постурального тремора (треморограмм) и их амплитудно-частотных характеристик у испытуемой (пациентки) *Gi* в спокойном состоянии без выраженных воздействий в разные моменты времени t_1 и t_2.

А



Б

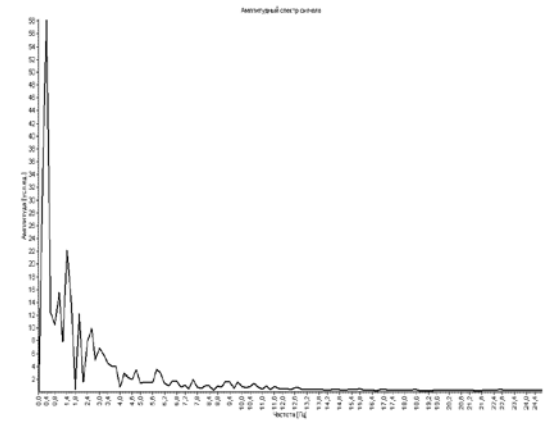
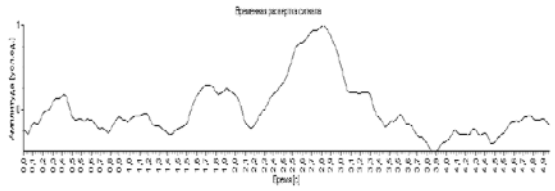


Рис. 1. Треморограммы (*А*) и их АЧХ (*Б*), снятые с пальцев испытуемой *Gi* в спокойном состоянии, в момент времени t_1

Исходные сигналы – треморограммы (рис. 1, *А* и 2, *А*) существенно отличаются друг от друга, и если повторять опыт многократно, то каждый раз будут получаться отличающиеся друг от друга кривые. Причина этого – невоспроизводимость результатов подобных экспериментов (невозможно получить идентичные ВСОЧ даже при одинаковых условиях эксперимента). Каждый раз регистрируемые показатели (сигналы) уникальны, и более того – уникальностью будет обладать каждый участок регистрируемого сигнала, что объясняется особенностями работы мозга (см. [2]).

Если исходить из общепринятых представлений о биологических динамических системах, то можно сделать предположение о том, что регистрируемый сигнал (треморограмма), обладая уникальностью по внутренним (структурным) свойствам, должен обладать стабильностью и быть сопоставим в различные моменты времени. В качестве простейшего структурного описания сигнала обычно выступает АЧХ регистрируемого сигнала (рис. 1, *Б*). При анализе реальных экспериментальных данных оказывается, что АЧХ регистрируемых сигналов также может варьироваться в широких пределах. Распределения амплитуд по частотному спектру существенно разняться, максимальные значения амплитуд тоже существенно отличаются (58 у.е. – в момент времени t_1, 36 у.е. – в момент времени t_2).

А



Б

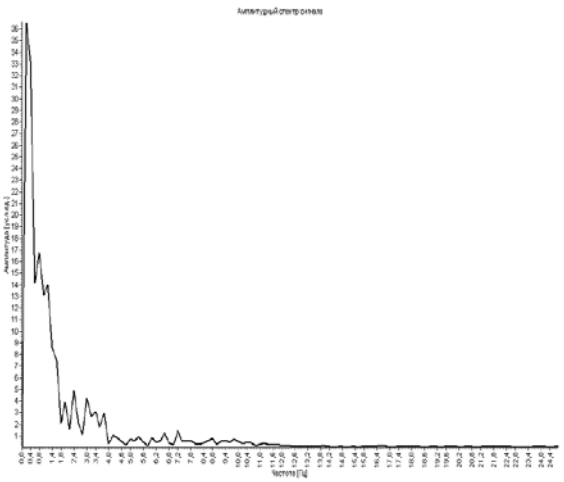


Рис. 2. Треморограммы и их АЧХ, снятые с пальцев испытуемой *Gi* в спокойном состоянии, в момент времени t_2

Для демонстрации существенной вариации АЧХ регистрируемого сигнала (треморограмм) были проведены следующие эксперименты: 1) регистрировался постуральный тремор (непроизвольные движения) у испытуемой *Gi*; 2) регистрировались движения пальцев рук испытуемой *Gi* во время теппинг-теста (произвольные движения). Каждый эксперимент был повторен 30 раз. Затем для каждого эксперимента были объединены полученные графики распределения АЧХ, результат приведен на рис. 3.

Видно, что АЧХ как при регистрации тремора, так и при регистрации во время теппинг-теста при многократных повторениях эксперимента обладают высокой вариабельностью. Кривые графиков АЧХ заполняют довольно обширные области и практически не повторяются. При этом возникает проблема идентификации состояния организма человека при анализе структурных характеристик регистрируемых сигналов.

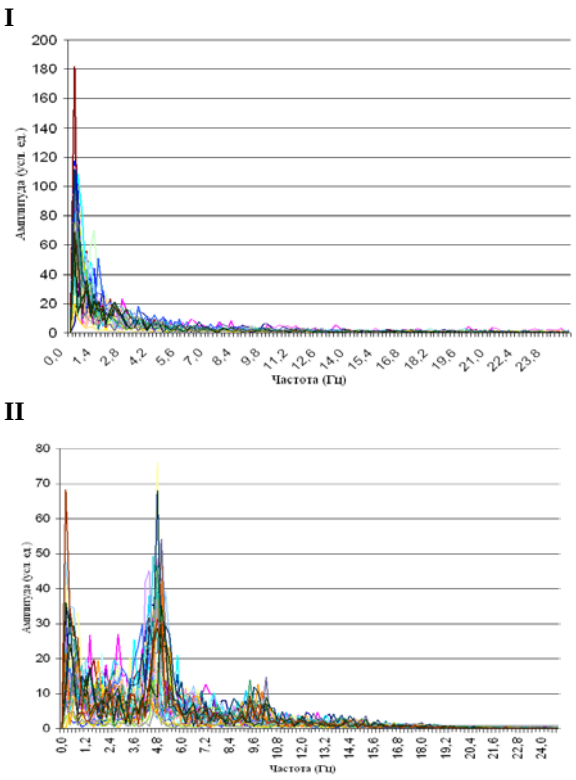


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики треморограмм испытуемой *Gi*. Треморограммы регистрировались в одинаковых условиях (в спокойном состоянии без внешних воздействий), 30 повторений. I – АЧХ постурального тремора; II – АЧХ во время теппинг-теста

Если представить *j*-е измерение параметров ВСОЧ (всего измерений l ($j = \overline{1,l}$)) для *q*-го испытуемого в некотором условно стационарном состоянии как вектор значений $\overline{X_j^q} = \{x_{j1}^q, x_{j2}^q, ..., x_{jm}^q\}$, где m – количество значений (размер фазового пространства) ВСОЧ (в приведенных примерах для АЧХ количество частот разложения исходного сигнала по преобразованию Фурье), x_{jk}^q – значение *k*-го параметра ВСОЧ (для АЧХ *k*-я частота разложения исходного сигнала по преобразованию Фурье) ($k = \overline{1,m}$), тогда можно сформировать два вектора

$$\overline{X_{\max}^q} = \{\max(x_{11}^q, ..., x_{l1}^q), ..., \max(x_{1m}^q, ..., a_{lm}^q)\}$$

и

$$\overline{X_{\min}^q} = \{\min(x_{11}^q, ..., x_{l1}^q), ..., \min(x_{1m}^q, ..., x_{lm}^q)\},$$

которые при большом количестве измерений (l) параметров будут ограничивать некоторую область, которая и будет описывать состояние организма испытуемого в том или ином состоянии. Иными словами, можно сформировать вектор максимальных значений и вектор минимальных значений параметров ВСОЧ. Такую область можно условно назвать областью вариабельности параметров ВСОЧ в некотором условно стационарном состоянии организма. На рис. 4 представлены графики областей вариабельности ВСОЧ, построенные на основе амплитудно-частотных характеристик треморограмм испытуемой *Gi*, представленных на рис. 3.

Рисунок 4 демонстрирует фактические области вариабельности ВСОЧ для испытуемой *Gi* в некотором условно стационарном состоянии (в спокойном состоянии без внешних воздействий). При изменении состояния (внутреннее или внешнее воздействие) испытуемой область вариабельности также изменяется.

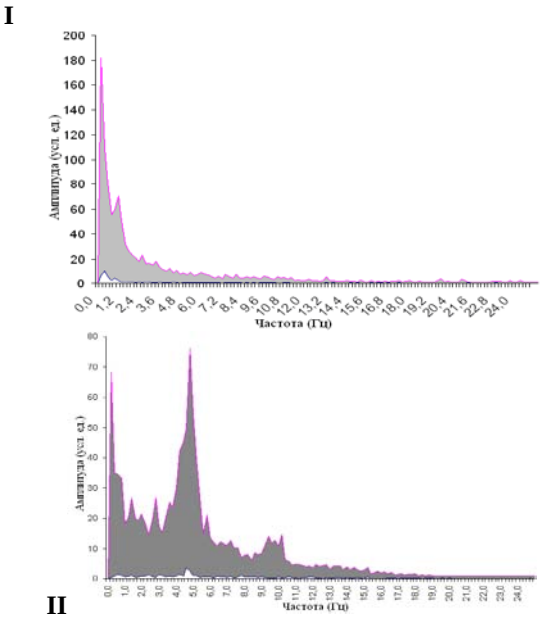


Рис. 4. Области вариабельности ВСОЧ, построенные на основе амплитудно-частотных характеристик треморограмм испытуемой *Gi*

Область вариабельности позволяет оценивать состояние организма человека по принадлежности к ней текущих значений параметров ВСОЧ, $\overline{X_j^q} \in [\overline{X_{\min}^{Dq}}, \overline{X_{\max}^{Dq}}]$ ($D \in N$ и характеризует некоторое условно стационарное состояние). Выход за границы или любое отклонение от области вариабельности будет говорить о переходе ВСОЧ в другое состояние. Причем область вариабельности ВСОЧ для каждого человека будет различной как для нормогенеза, так и для различных патологических или возбужденных состояний. Фактически появляется возможность построения индивидуальной (персонифицированной) меры, идентификации нормогенеза и патогенеза человека. Однако имеются определенные трудности в количественном представлении таких обобщенных характеристик хаоса в биосистемах. В рамках теории хаоса-самоорганизации мы предлагаем использовать объемы квазиаттракторов и координаты их центров. Для этого мы вводим две координаты x_1 (положение пальца в пространстве) и $x_2 = dx_1 / dt$. В ряде случаев мы используем и трехмерное пространство, где $x_3 = dx_3 / dt$. В этих фазовых пространствах объемы квазиаттракторов в виде V_G являются количественными характеристиками (мерой) непроизвольности в произвольном движении (теппинг) и якобы непроизвольных движений (постуральный тремор). Произвольность тремора

заключена в цели удержания конечности в заданной точке пространства. Более того, Бернштейн вообще определял каждое движение как готовность перехода к следующему акту. Поэтому тремор – это готовность к выполнению движения, и движение это будет произвольным. Однако такое произвольное движение определяется непроизвольно (по факту реализации), так как никогда не может быть повторено, воспроизведено абсолютно, а только в пределах квазиаттракторов.

В июне 2012 г. в журнале Nature группа ученых из Станфордского университета это констатировала. Но мы около 30 лет показываем, как моделировать и формализовать такие непроизвольности в движении. Более того, мы используем параметры этой непроизвольности в биологии и медицине. Для этого развивается теория хаоса-самоорганизации.

Литература

1. *Еськов В.М.* Третья парадигма. Самара : Офорт, 2011. 249 с.

2. *Гавриленко Т.В., Балтикова А.А., Дегтярев Д.А. и др.* Хаотическая динамика непроизвольных движений конечности человека в 4-мерном фазовом пространстве // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2012. № 1. С. 86–94.

3. *Еськов В.М., Буров И.В., Филатова О.Е., Хадарцев А.А.* Основы биоинформационного анализа динамики микрохаотического поведения биосистем // Вестник новых медицинских технологий. 2012. Т. 19, № 1. С. 15–18.

4. *Филатов М.А., Филатова Д.Ю., Химикова О.И., Романова Ю.В.* Метод матриц межаттракторных расстояний в идентификации психофизиологических функций человека // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2012. № 1. С. 21-25.

Новые представления о стационарности и предсказуемости в когнитивных науках. Принципы работы мозга

В.М. Еськов[1], А.А. Хадарцев[2], О.Е. Филатова[1], Е.С. Шерстюк[1]

[1]Сургутский государственный университет
[2]Тульский государственный университет
karmacurator@mail.ru

В рамках детерминистского подхода постулируется строгая адекватность динамики поведения любой природной динамической системы динамике поведения ее вектора состояния, которая получается теоретически с использованием физико-математических моделей. При этом мы должны точно знать начальные условия, т. е. координаты $x(t_0)$ вектора состояния системы (ВСС) в виде $x = x(t) = (x_1, x_2, \ldots, x_m)^T$ для решения задачи Коши или при использовании любых других модельных динамик реальной системы. Начальные условия нужны в любых моделях при использовании всего детерминистско-стохастического подхода, но они отсутствуют в теории хаоса-самоорганизации – ТХС.

В стохастике проверка идентичности состояния реальной природной системы и ее модели в виде функции распределения $f(x)$ потребует некоторого повторения событий (явлений, процессов) и получения некоторых частот $P^*(A)$, которые в идеале могли бы представить вероятности $P(A)$, а значит, и $f(x)$. Однако стохастический подход обычно ограничен в числе повторений процессов, и мы всегда будем иметь оценочные (приблизительные) характеристики реальной $f(x)$, т. е. условно одинаковые модели процесса. Введение уровней значимости, или доверительных интервалов, различных критериев достоверности ограничивает точность утверждения о репрезентативности любой стохастической модели и тем более точность утверждения о ее сходстве с реальными процессами. В стохастике все такие утверждения носят условный характер, но мы можем повторить функцию распределения для процесса или системы.

Если говорить точно, то стохастика уже допускает условность того, что реальный процесс – это не единственное представление объекта, что объект неоднородный, многовариантный и в конечном счете неопределенный. В стохастике неопределенность появляется на конечном этапе поведения изучаемой системы, так как начальное состояние объекта все-таки должно быть точно определено. Остается открытым вопрос: что делать с системами, которые уникальны, неповторимы и невоспроизводимы? I.R. Prigogine утверждал, что такие системы не являются объектом традиционной науки [1]. У нас имеется другая точка зрения на эти неопределенные (единичные и невоспроизводимые) системы при условии, что у них имеются некоторые механизмы внутренней самоорганизации, или в случаях, если их хаотической динамикой кто-то (или что-то) пытается управлять. Попытка формализации в описании этих систем начинается с ответа на вопрос: что такое стационарный режим поведения биосистем и каковы критерии идентичного поведения таких сложных систем, т. е. complexity? Очевидно, проблема идентификации стационарных режимов любых систем переходит в проблему доказательства тождественности (или одинаковости) двух разных состояний одной системы или при сравнении нескольких систем.

Компартментно-кластерный подход, как попытка описания complexity, использует первый тип неопределенности (или отсутствие одинаковости) в системах. H. Haken в 1969 г. в Штутгарте попытался подвести человечество к решению подобных (указанных выше) задач. Однако дальше понимания особенностей (а их он выделил 10 [2]) сложных систем и формулирования первого, базового принципа синергетики (он с добавлением и изменением был положен в основу развиваемой нами теории хаоса-самоорганизации) дело не пошло. Вся формализация complexity осталась в рамках детерминизма и стохастики. Поэтому и дискуссии H. Haken с I.R. Prigogine были лишены смысла, так как оба этих ученых находились в рамках ДСП, и особых результатов в своем развитии синергетика не получила, равно как и теория complexity.

Однако в рамках 1-го постулата H. Haken (этот постулат был первый и в ТХС) о том, что нет смысла изучать динамику поведения отдельного элемента сложной системы (при условии, что система однородна, иначе отдельный, иерархический элемент или кластер будет полностью определять динамику всей динамической системы), была введена и первая глобальная неопределенность в изучении complexity. Эта неопределенность H. Haken связана не только с неопределенностью свойств и состояния отдельного элемента complexity, но и с числом этих элементов в пуле, компартменте или даже кластере (как объединении компарментов). Итак, мы согласны с тем, что динамика поведения группы элементов определяет динамику всей системы. Важно состояние всего вектора, описывающего состояние всей системы. ТХС с этим соглашается, но при этом мы добавляем и 2-й постулат, который не был декларирован ни H. Haken, ни I.R. Prigogine, ни кем-либо еще другим. Это 2-й постулат ТХС, и звучит он так: не только динамика поведения отдельного элемента не имеет информационного значения, но и конкретное состояние complexity (точка в фазовом пространстве состояний – ФПС, которая представляет конкретное значение ВСС в ФПС) не имеет информационного

значения, т. е. мы этим состоянием можем пренебречь.

Последствия 2-го постулата ТХС, как и последующих еще 3 мы уже многократно обсуждали [3, 4], так как из-за этого постулата пришлось вводить аналог принципа неопределенности Гейзенберга для живых систем. Сейчас же представим последствия 1-го постулата о компартментно-кластерной структуре любой сложной биосистемы, который весьма значителен для биологии и медицины. Для дальнейшего понимания введем ряд понятий и определений, которые обеспечивают формализацию описания complexity. Эта формализация включает наличие ВСС в виде $x = x(t)$ для описания любой биологической динамической системы. Это очевидно, так как любой организм может характеризоваться переменными и эти переменные формируют понятие гомеостаза. В рамках ДСП гомеостаз трактуется обычно как стационарное состояние БДС, т. е. примитивно в виде $dx/dt = 0$ и $x_i = \text{const}$. Однако в природе ничего такого не бывает, и поэтому обычно гомеостаз интерпретируют в рамках функций распределения $f(x)$ и условного сохранения числовых характеристик параметров $f(x)$. Например, представляют попадание x_i в некоторый доверительный интервал, внутри которого с доверительной вероятностью β находится истинное значение измеряемой (случайной) величины. Существует множество критериев проверки такой условной «одинаковости», но суть остается без изменений: с определенными условностями система находится в том же состоянии, что и была ранее (или другая система, ей подобная).

Сохранение интерпретации таких, в общем, примитивных трактовок и понятий стационарных режимов в действительности не соответствует реальным биосистемам, как мы покажем ниже, но даже такой примитивизм, как оказалось, может дать ряд положительных эффектов в моделировании, описании реальных БДС. Ситуация подобна известной истории с преобразованиями Лоренца, которые самому Лоренцу так и не понадобились, но они оказались полезными А. Эйнштейну и другим физикам. Итак, в рамках компартментно-кластерной теории биосистем (ККТБ) мы постулируем ряд реальных принципов (условий) организации биосистем в кластеры, и на базе этих условий сформулируем и получим ряд теорем и результатов, связанных с реальной динамикой сложных систем, т. е. complexity, которые организованы по компартментно-кластерным, т. е. в рамках первого постулата ТХС.

Полученные нами ранее различные и весьма сложные динамики поведения биосистем в рамках ККТБ были детально изучены на количественных примерах из области поведения нейронных сетей дыхательного центра и регуляции работы сердца. Эти два характерных примера якобы периодических биологических генераторов на самом деле демонстрируют удивительную непериодичность (хаотичность) и реальное отсутствие произвольности в своей динамике поведения (хотя столетия физиологи говорили о произвольности дыхания!). На эту тему в периодической научной (биологической) печати практически ничего не говорят (искусственно замалчивают), но в действительности процессы дыхания и работы сердца (как и любые другие кластеры гомеостаза) выглядят совершенно иначе.

Сейчас мы должны констатировать один глобальный биологический факт: в живой природе отсутствуют любые произвольные биомеханические движения, произвольное дыхание, любая произвольная регуляция любых функций организма. Точнее говоря, определенная доля произвольности имеется, так как вы можете вроде произвольно вздохнуть, вроде произвольно двигать рукой, двигаться в пространстве, произвольно даже заболеть и умереть, но… любая такая произвольность не будет произвольностью по сути. Произвольно и точно мы можем только инициировать процесс (движения, вдоха или выдоха и т. д.), но дальше динамика процесса протекает в режиме управляемого хаоса, так как произвольно мы ничего не можем делать. Для всех этих процессов справедлив 2-й постулат ТХС. Это значит, что любая реализация (якобы произвольная) в виде движения, сердцебиения, гомеостаза в целом не может быть повторена произвольно и точно, идентично в пространстве и во времени. Любой компонент x_i любого ВСС совершает в ФПС непрерывное хаотическое движение, и это движение будет непроизвольным по сути, так как никто не сможет его 2 раза повторить одинаково. Отсюда следует и отсутствие стационарных режимов, так как они предполагают неизменность параметров ВСС.

На строгом, физическом уровне это означает, что начальное состояние не может быть повторено, так как ВСС в виде $x(t_0)$ никогда и никем произвольно не может быть воспроизведен. Это $x(t_0)$ имеет единичный характер. Никакой отрезок тремограммы, миограммы (работы дыхательных мышц), электроэнцефалограммы, кардиограммы не может быть повторен и воспроизведен точно. Более того, их хаотическая динамика может не иметь аналогов в виде функций распределения, констант Ляпунова или в виде сходимости автокорреляционных функций. Для иллюстрации можно представить два примера: динамику поведения во времени тремограммы и динамику поведения кардиограммы (точнее, переведенную кардиограмму в кардиоинтервалограмму с помощью быстрого преобразования Фурье).

Если мы внесем определенные возмущения в организм человека (в виде шумовых воздействий, физической нагрузки, дозы алкоголя и т.д.), то во всех общепринятых в детерминизме и стохастике характеристиках (тремограмме, АЧХ, автокорреляционной функции и т. д.) ничего существенного не произойдет. Точнее говоря, на фоне общего хаоса в АЧХ, самой тремограмме, ее автокорреляционных функций мы не увидим изменений. Однако происходит изменение в параметрах квазиаттрактора, который характеризует измене-

ния параметров хаотической динамики исследуемой биомеханической системы. И именно эти изменения и представляют переход функций организма человека из одного физиологического состояния в другое.

Хаос на уровне квазиаттрактора может характеризоваться параметрами квазиаттрактора, которые существенно изменяются при переходе от одного стационарного состояния организма к другому. Например, при переходе от нормы к патологии или при старении организма, других изменениях в системе регуляции гомеостаза в целом.

Нечто подобное мы можем продемонстрировать и для системы регуляции частоты сердечных сокращений и многих других регуляторных систем, которые в целом обеспечивают гомеостаз. Исходя из этого, мы должны изменять наши представления и о хаосе, и о стационарных режимах биосистем, и о подобии тех или иных биосистем друг другу. Когда мы говорим о подобии заболеваний, то мы должны сравнивать квазиаттракторы, а не конкретные x_i.

В целом понятие стационарных режимов биосистем мы предлагаем пересмотреть именно в аспекте отхода от традиционного детерминистского подхода (когда $dx/dt = 0$) и от стохастического подхода. В последнем случае остается дискуссионной проблема регистрации равномерного или неравномерного распределения компонент ВСС x_i по всем координатам ФПС. В ТХС мы склонны утверждать наличие равномерного распределения x_i , так как не только x_i мерцают, но и с увеличением интервала измерения T квазиаттракторы эволюционируют в ФПС. А это, как минимум, приводит к эволюции всех числовых характеристик, если их использовать и специально рассчитывать. Будет «уплывать» и мода, и медиана, и дисперсия… Не будет никакой стабильности в параметрах ВСС, и говорить об $f(x)$ нет никакого смысла. Проще использовать параметры квазиаттракторов.

В этих всех особенностях хаотической динамики поведения любых биологических динамических систем – БДС имеется весьма неудобное обстоятельство, которое связано с третьим (эволюция) и пятым (внезапная возможность выхода параметров ВСС за пределы 3, 10 или даже 20 сигм) свойствами реальных систем третьего типа – СТТ. Поскольку это все хаотические системы, то возникновение этих редких, но реальных событий никем не прогнозируется, не рассчитывается. Выход только один – непрерывный мониторинг параметров ВСС, и даже более того постоянная внешняя провокация в виде внешних возмущающих воздействий. Тогда можно регистрировать выход системы в виде марковских параметров y_i или некоторой выходной функции $y(t)$.

Для человека последнее выглядит довольно безобидно. Например, необходимо регулярно выполнять физическую нагрузку и при этом регулярно наблюдать вариации как можно большего количества компонент ВСС. Для подобного эксперимента нами была разработана специальная система идентификации интервалов устойчивости БДС под действием внешних возмущающих воздействий. Эта процедура хорошо формализована, но ее описание занимает достаточно много места и не будет сейчас представлено.

Таким образом, подводя итог настоящего сообщения, мы должны подчеркнуть, что задача идентификации стационарных режимов в ТХС вливается в общую задачу идентификации идентичности любых режимов БДС, в идентификацию интервалов устойчивости СТТ на фоне постоянных хаотических движений ВСС в ФПС. Это потребует ухода от традиционных представлений в физике и технике о стационарных режимах, которые применяются и при изучении БДС в рамках общепринятых представлений. Поскольку БДС-comlexity – это особые динамические системы, то и методы их изучения должны быть особыми. При этом и одновременно мы вынуждены пересмотреть наши представления в медицине об идентификации понятий нормы и патологии. Если раньше мы понимали под нормой устойчивое состояние объекта в режиме $dx/dt = 0$ или приблизительно постоянных значений параметров функции распределения $f(x)$, то теперь мы говорим о постоянной хаотической динамике поведения ВСС в ФПС в пределах определенных квазиаттракторов.

В ТХС норма – это непрерывное хаотическое движение ВСС в пределах КА. И даже если мы имеем некоторое периодическое движение (дыхание, сердцебиение), то это также происходит хаотично, в пределах квазиаттракторов. Наоборот, патология может начинаться с регулярных колебаний ВСС в ФПС или даже вообще со стационарных режимов, что крайне нежелательно. Конечная стационарность – термодинамическое равновесие с окружающей средой, когда энтропия $S \rightarrow \max$, градиенты отсутствуют, все в равновесии с физической точки зрения, а с биологической точки зрения это смерть. Таковы «гримасы» гомеостазы и реалии существования биосистем. Жизнь – это непрерывный, хаотический «тремор» ВСС в ФПС, и это новое понимание жизни. Очевидно, что и работа мозга сводится к калейдоскопу неповторяемых состояний нейросетей (число этих состояний более 10^{100}).

Литература

1. *Prigogine I.R.* The Die Is Not Cast // Futures : Bulletin of the World Futures Studies Federation. 2000. V. 25, № 4. P. 17–19.
2. *Haken H.* Principles of brain functioning: a synergetic approach to brain activity, behavior and cognition. Springer, 1995. 349 p. (Springer series in synergetics).
3. *Eskov V.M.* Third paradigm. Samara : Ofort, 2011. 240 p.
4. *Eskov V.M., Eskov V.V., Filatova O.E., Filatov M.A.* Two types of systems and three types of paradigms in systems philosophy and system science // J. Biomedical Science and Engineering. 2012. V. 5, № 10. P. 602–607.

Молекулярные механизмы восприятия и первичной обработки сенсорных сигналов в нейронных системах

А.Л. Проскура[1], Т.А. Запара[1], И.А. Малахин[2,1], А.С. Ратушняк[1]

[1]Конструкторско-технологический институт ВТ СО РАН, Новосибирск
[2]Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск
ratushniak.alex@gmail.com

В последние годы благодаря данным, полученным на высших приматах, сформировалась парадигма распределенной сети памяти [1]. Главным в новой парадигме является концепция памяти сети, или «когнит». Согласно парадигме память или элемент знаний определяется структурой ассоциативных связей между нейронами или популяциями нейронов. Эти связи образуются, улучшаются и расширяются зависимыми от опыта синаптическими модуляциями. Когниты перекрываются, многократно соединяются, и, согласно этой парадигме, нейрон может быть участником, частью многих сетей и, следовательно, многих воспоминаний или элементов знания. Становится очевидным, что связи сетей мозга, в том числе ассоциативные, возникают в пределах нейрона в результате молекулярных реакций, инициированных внешними воздействиями, и приводят к модуляциям их синаптических контактов. Нейроны благодаря совокупности циклов восприятие – реакция представляют когнитивные элементы. В рамках парадигмы распределенной сети памяти основное внимание уделяется сети нейронов. Мы попытались на основе анализа данных об изменениях эффективности возбуждающей синаптической передачи реконструировать схему связей между белками, причастными к структурно-функциональным синаптическим модуляциям.

Дендритные шипики – маленькое (< 1 мкм) выпячивание, происходящее от осевого дендрита, представляют постсинаптическую часть синапса, являются структурой большинства возбуждающих синапсов мозга млекопитающих. Белки шипика участвует в восприятии, реализации изменений и сохранении синаптических контактов. Известно, что непосредственно с рецепторами медиатора глутамата в шипике взаимодействует порядка 500 белков. Большое количество фактических данных приводит к тому, что восприятие целостной картины комплекса процессов, связанных с образованием и изменениями синаптических контактов нейрона, без специального инструментария становится сложной, если вообще возможной задачей. Проблема заключается в необходимости классификации, легком доступе к накопленным знаниям, их визуализации – представлении в виде структурных моделей. Одним из инструментов, способных значительно облегчить анализ сложных функциональных систем с множеством взаимодействующих элементов являются компьютерные технологии, которые совмещают в себе возможность хранения данных в базе с возможностью их визуализации в виде диаграмм.

На основе анализа экспериментальных данных нами реконструирована молекулярная сеть дендритного шипика – функциональная система, которая находится в «собранном состоянии» в пределах дендритного шипика и способна увеличить эффективность синаптического контакта на определенный паттерн воздействий медиатора (глутамата) (http://wwwmgs.bionet.nsc.ru/mgs/gnw/genenet/viewer/Early long-term potentiation.html).

Сеть, представленная на сайте, дает общее представление о структурной компоновке элементов шипика с определенной горизонтальной и вертикальной организацией: мембраны (синаптическая, перисинаптическая и экстрасинаптические зоны), подмембранной зоны (цитоплазматические хвосты рецепторов и подмембранные белки) на цитоплазматическом уровне (микродомены белков, сеть актиновых филаментов, наличие внутриклеточных депо рецепторов и других белков). Сеть является интерактивной, и можно получить информацию об объектах и связях из базы данных GeneNet (в формате XML), включая ссылку на публикацию и на другие базы данных.

Структурная организация дендритного шипика гиппокампа

Глутаматные рецепторы (ГР) расположены в активной зоне мембраны шипика, которая точно позиционирована под пресинаптической терминалью. Ионотропные ГР являются рецепторно-ионофорными комплексами. До индукции ДП в зоне синаптической мембраны присутствуют АМПАР типа 2/3, проницаемые для Na+. НМДАР проницаемы для Ca^{2+} и обладают одновременно хемо- и потенциал-чувствительностью, при потенциале покоя они заблокированы Mg^{2+} (этот блок снимается при деполяризации в узком диапазоне –30 – – 20 мВ) [2]. Синаптическая мембрана переходит в зону перисинаптической мембраны. Эта зона является динамическим депо рецепторов, где происходит экзоцитоз эндосом с ГР [3, 4, 5]. Под зоной синаптической мембраны расположены белки, удерживающие рецепторы в синапсе и связывающие с цитоскелетом (scaffold proteins), протеинкиназы, протеазы, транспортные белки, ГТФазы и их регуляторы, образующие постсинаптическое уплотнение (ПСУ) [6].

Размером и стабильностью ПСУ управляют скаффолдные белки. Эти белки имеют один или нескольких PDZ-доменов (короткие консервативные последовательности аминокислот). Эти последовательности осуществляют высокоаффинное

взаимодействие между протеинами. Белки ПСУ обеспечивает закрепление ГР в активной зоне шипика: НМДАР непосредственно через свою субъединицу (NR2) (в центре ПСУ) и АМПАР через белки семейства старгазинов (по периферии) [7, 8]. Белки с PDZ-доменами позволяют организовать физическое взаимодействие и позиционирование молекул-партнеров определенного процесса в надмолекулярные комплексы — микродомены [9]. Известно, что АМПА-рецепторы образуют связи с 9 белками ПСУ, а НМДАР — более чем с 450 белками [10].

Актиновый цитоскелет дендритного шипика и его ремоделирование

Дендритные шипики обогащены белком актином, представленным мономерной (G-actin) и полимерной (F-actin) формами. Переходы между этими формами являются АТФ зависимыми и регулируются множеством актин-связывающих белков. Полимеризация G-actin в F-actin проходит в несколько этапов, протекающих параллельно: элонгация, диссоциация, фрагментация, стыковка [11]. Цитоскелет в основном представлен полимерной формой – микрофиламентами [12], которые образуют сложную систему нитей, соединенных между собой в параллельные пучки и трехмерные сети [13].

Перестройка цитоскелета инициируется медиаторами и другими лигандами через их рецепторы. Трансдукция сигналов от рецепторов к цитоскелету происходит при посредничестве семейства малых ГТФаз, регуляторов их активности, специфических киназ, фосфатаз, многочисленных белков, непосредственно взаимодействующих как с G-actin, так и с F-actin.

ГТФазы циркулируют между активным и неактивным состояниями. Переходы регулируются белками-регуляторами, такими как GEFs (guanine–nucleotide exchange factors), которые способствуют переходу ГДФ в ГТФ, и GAPs (GTP-ase activating proteins), которые способствуют переходу ГТФ в ГДФ. Малые Rho ГТФазы имеют свои специфические GEF_{Rho} и GAP_{Rho}. ГТФазы, GAPs и GEFs присутствуют в ПСУ, где они идеально расположены для регуляции ГР и CAMKII, либо встраиваются в ПСУ высокими уровнями Ca^{2+} при активации рецепторов [14]. Например, в сети отображено, что Rac1 активируется GEF $Tiam1_{Rac1}$ и инактивируется как собственным GAP $MEGAP_{Rac1}$, так и опосредованно через $SynGAP_{Ras}$. Каскад НМДАР–Ca^{2+}–CAMKII влияет на активацию Rac1 как положительно, прямо фосфорилируя GEF $Tiam1_{Rac1}$ [15], так и отрицательно через активацию $SynGap_{Ras}$ [16]. Акцептором Rac1 является PAK, которая в свою очередь рекрутируется в ПСУ через формирование комплекса со скаффолдом Shank и GEF $PIX_{Rac1/Cdc42}$.

Деполимеризацию микрофиламентов в основном осуществляет кофилин (cofilin). В дефосфорилированном состоянии cofilin механически воздействует на полимер, вызывая его слом, что приводит к возникновению коротких нитей и пула G-actin [17]. Фосфорилирование кофилина осуществляется каскадами RhoA-ROCK-LIMK и Rac1/Cdc42-PAK-LIMK, что вызывает его переход от цитоскелета в цитоплазму [18]. Дефосфорилирование кофилина контролируется Ca^{2+}-зависимой фосфатазой — кальциневрином (calcineurin) [19]. Комплекс RhoA-ROCKII белок профилин-II стабилизирует подмембранный F-actin, что обеспечивает дополнительное закрепление ионотропных ГР на синаптической мембране [20].

Реорганизация актинового цитоскелета также регулируется немышечными миозинами-2 (myosin II (A, B)). Эти белки образуют димеры, которые способны, гидролизуя АТР, перемещаться по микрофиламентам, поддерживая актомиозиновую напряженность (жесткость) актинового цитоскелета, а также вызывать их разрывы во время ремоделирования цитоскелета [21].

Структурно-функциональные изменения дендритных шипиков, опосредующие увеличение эффективности синаптической передачи

Одной из наиболее разработанных экспериментальных моделей для изучения синаптической пластичности in vitro является ДП – длительное увеличение амплитуды ответов на тестирующий стимул, возникающее после интенсивного и непродолжительного выброса глутамата, например в результате высокочастотной стимуляции афферентных входов пирамидных нейронов гиппокампа поля CA1 [22]. Появились методы, позволяющие вызвать функционально-структурные изменения, связанные с ДП в отдельном дендритном шипике [6, 23, 24].

Взаимодействие Glu с $АМПАР_{2/3}$ в мс-интервале инициирует вход Na+, что приводит к деполяризации синаптической мембраны и собственно распространению нейротрансмиссии по мембране нейрона [25].

Кроме того, если деполяризация синаптической мембраны достигает порога активации НМДАР, происходит вход Ca^{2+} в шипик [23]. Вход этого вторичного посредника через НМДАР индуцирует синаптическую ДП. Необходимо отменить, что ДП развивается и поддерживается (во времени и различных компартментах клетки) за счет активации и взаимодействия как функциональных микродоменов, так и функциональных систем нейрона (например, вакуолярной системы).

После НМДАР зависимой индукции ДП в интервале 30–60 с регистрируется увеличение амплитуды синаптических токов на 200–300 %. Увеличение токов обусловлено диффузией в плоскости мембраны $АМПАР_{1/2}$ из перисинаптической в синаптическую зону мембраны и их взаимодействие с белками ПСУ. В этот период происходит увеличение объема шипика [26, 27], вызванное встраиванием новых везикул [28].

Таким образом, структурно-функциональная синаптическая пластичность возникает при встра-

ивании АМПАР$_{1/2}$ типа в мембрану синаптической зоны и увеличении объема шипика [29].

НМДАР-опосредованный вход Ca^{2+} ограничен головкой шипика. Активность Ca^{2+} затухает с постоянной времени приблизительно 0,1 с [30, 31].

Ca^{2+}-зависимая активация CaMKII также ограничена шипиком и затухает с постоянной времени приблизительно 10 с [30], интегрируя НМДАР-опосредованный вход Ca^{2}.

Rho GTPases переключают кратковременный компартментный сигналинг Ca^{2+}/CaMKII на более продолжительное время.

Кратковременный сигналинг CaMKII [30, 31] переключается на локальную, длительную активацию Rho GTPases, максимум которой достигается между активацией CaMKII и изменением объема шипика, что ведет к долгосрочной структурной пластичности шипика, ассоциированной с ремоделированием актинового цитоскелета [31–34].

Пространственно-временная динамика Rho GTPases имеет отличия. Активация RhoA и Cdc42 достигает максимума приблизительно через 30 с, в течение 5 мин активность снижается, а затем активность стабильно поддерживается больше чем 30 мин [35]. Активация Cdc42 ограничена активированным шипиком [30]. Учитывая, что высокий пространственный градиент Cdc42 между стимулируемым шипиком и дендритом поддерживается больше 30 мин, Cdc42 должен непрерывно активизироваться в шипиках и инактивироваться немедленно после выхода из шипика. Активация Ras увеличивается до максимума в течение одной минуты после стимула и возвращается к базовому уровню в течение 15 мин [36]. Для выхода из головки шипика в дендрит активных Ras и RhoA требуется время порядка секунды. Активный Ras распространяется диффузией вдоль родительского дендрита около 10 мкм и вторгаются в 10–20 соседних синапсов [36]. Активный RhoA распространяется на расстояние около 5 мкм и также проникает в соседние шипики.

Динамическая молекулярная сеть, активность которой инициируется путем активации рецепторов глутамата, отражает способность многочисленных синаптических контактов нейрона к структурно-функциональной реорганизации, используя только собственные ресурсы. Механизм распространения Rho GTPases вдоль родительского дендрита может лежать в основе ассоциации сигналов, приходящих из нейронной сети на близко расположенные соседние шипики.

Однако для поддержания нового состояния синаптического контакта необходима связь с другими компартментами нейрона.

Доставки структурных элементов в дендритный шипик

Для длительного сохранения ДП необходим синтез новых белков, происходящий в соме нейрона, в том числе и АМПА рецепторов [37]. ДП в гиппокампе может сохраняться долгое время, однако, при нарушении синтеза белка, не дольше 30–60 мин. В этот начальный период для поддержания ДП в большей мере, чем синтез протеинов, требуется посттрансляционная модификация протеинов и формирование липидно-белковых везикул в вакуолярной системе [38]. Поддержание нового уровня передачи сопровождается заменой рецепторов АМПА1/2 на АМПА2/3 подтипа [39]. Молекулярная сеть (карта), отражающая эти процессы, представлена на сайте http://wwwmgs.bionet.nsc.ru/mgs/gnw/genenet/viewer/AMPA.html.

Запас AMPAR2/3 находится в вакуолярной системе, где они входят в состав везикул и доставляются в шипики. Движение белков между компартментами вакуолярной системы (эндоплазматический ретикулум, аппарат Гольджи, транс-Гольджи-сеть, эндосомы) и их доставка в шипик опосредуются малыми транспортными везикулами, которые отпочковываются от донорного компартмента и затем сплавляются с акцепторным компартментом [40]. Точность сборки везикулы контролируется белками ее покрытия. Запуск формирования покрытия везикулы, а также ее отпочковывание от донорного компартмента регулируется белками семейства малых ГТФаз – ARF (ADP-ribosylation factor).

Транспортные везикулы с АМПА-рецепторами направляются в дендрит, где могут быть инкорпорированы в плазматическую мембрану дендрита или шипика либо в дендритный везикуло-тубулярный запасник рецепторов [41]. Нарушение сборки везикул блокаторами этого процесса вызывает значительный спад эффективности синаптической передачи в течение первых 20 мин ДП [42].

Вероятно, молекулярные функциональные системы дендритных шипиков, конвертирующие нейротрансмиссию (процесс рецепции) в структурно-функциональные изменения синаптических контактов являются субстратом (единицами) памяти, «знаний» нейронов.

Работа выполнена при поддержке базового проекта фундаментальных исследований РАН 35.1.5, интеграционных проектов президиума СО РАН 108, 136, гранта РФФИ 12-01-00639.

Литература

1. *Fuster J.M.* Cortex and Memory: Emergence of a New Paradigm // J. Cognitive Neurosci. 2009. V. 21. P. 2047–2072.

2. *Schiller J., Schiller Y., Clapham D.E.* NMDARs amplify calcium influx into dendritic spines during associative pre- and postsynaptic activation // Nat. Neurosci. 1998. V. 1. P. 114–119.

3. *Ashby M.C. et al.* Removal of AMPA receptors (AMPARs) from synapses is preceded by transient endocytosis of extrasynaptic AMPARs // J. Neurosci. 2004. V. 24. P. 5172–5176.

4. *Ashby M.C. et al*. Lateral diffusion drives constitutive exchange of AMPA receptors at dendritic spines and is regulated by spine morphology // J. Neurosci. 2006. V. 26. P. 7046–7055.

5. *Tardin C. et al.* Direct imaging of lateral movements of AMPA receptors inside synapses //. EMBO J. 2003. V. 22. P. 4656–4665.

6. *Valtschanoff J.G., Weinberg R.J.* Laminar organization of the NMDA receptor complex within the postsynaptic density // J. Neurosci. 2001. V. 21. P. 1211–1217.

7. *Choi J. et al*. Phosphorylation of stargazin by protein kinase A regulates its interaction with PSD-95 //J. Biol. Chem. 2002. V. 277. P. 12359–12363.

8. *Tomita S. et al*. Bidirectional synaptic plasticity regulated by phosphorylation of stargazin-like TARPs // Neuron. 2005. V. 45. P. 269–277.

9. *Tsunoda S. et al*. A multivalent PDZ-domain protein assembles signaling complexes in a G-protein-coupled cascade // Nature. 1997. V. 388. P. 243–249.

10. Pastalkova E. *et al.* Storage of spatial information by the maintenance mechanism of LTP // Science. 2006. V. 313. P. 1141–1144.

11. *Lin W.-H., Webb D.J.* Actin and actin-binding proteins: masters of dendritic spine formation, morphology, and function // Open Neurosci J. 2009. V. 1. P. 54–66.

12. *Korobova F., Svitkina T.* Molecular architecture of synaptic actin cytoskeleton in hippocampal neurons reveals a mechanism of dendritic spine morphogenesis // Mol. Biol. Cell. 2010. V. 21. P. 165–176.

13. *Попов В.И. и др.* Трехмерные реконструкции синапсов и дендритных шипиков в гиппокампе крыс и сусликов: новые структурно-функциональные парадигмы работы синапсов // Журн. высш. нервн. деят. 2004. Т. 54. С. 120–129.

14. *Tejada-Simon M.V. et al.* NMDA receptor activation induces translocation and activation of Rac in mouse hippocampal area CA1 // Biochem. Biophys. Res. Commun. 2006. V. 343. P. 504–512.

15. *Fleming I.N. et al.* Ca^{2+}/calmodulin-dependent protein kinase II regulates Tiam1 by reversible protein phosphorylation // J. Biol. Chem. 1999. V. 274. P. 12753–12758.

16. *Carlisle H.J. et al.* SynGAP regulates steady-state and activity-dependent phosphorylation of cofilin // J. Neurosci. 2008. V. 28. P. 13673–13683.

17. *McGough A. et al.* Cofilin changes the twist of F-actin: implications for actin filament dynamics and cellular function // J. Cell Biol. 1997. V. 138. P. 771–781.

18. *Meng Y. et al.* Abnormal spine morphology and enhanced LTP in LIMK-1 knockout mice // Neuron. 2002. V. 35. P. 121–133.

19. *Halpain S., Hipolito A., Saffer L.* Regulation of F-actin stability in dendritic spines by glutamate receptors and calcineurin // J. Neurosci. 1998. V. 18. P. 9835–9844.

20. *Schubert V., Da Silva J.S., Dotti C.G.* Localized recruitment and activation of RhoA underlies dendritic spine morphology in a glutamate receptor-dependent manner // J. Cell Biol. 2006. V. 172. P. 453–467.

21. *Sellers J.R.* Myosins: a diverse superfamily // Biochim. Biophys. Acta. 2000. V. 1496. P. 3–22.

22. *Sweatt J.D.* Toward a molecular explanation for long-term potentiation // Learn. Mem. 1999. V. 6. P. 399–416.

23. *Hotulainen P., Hoogenraad C.C.* Actin in dendritic spines: connecting dynamics to function // J. Cell. Biol. 2010. V. 189. P. 619–629.

24. *Luna E.J., Hitt A.L.* Cytoskeleton-plasma membrane interactions // Science. 1992. V. 258. P. 955–964.

25. *Lai H.C., Jan L.Y.* The distribution and targeting of neuronal voltage-gated ion channels // Nat. Rev. Neurosci. 2006. V. 7. P. 548–562.

26. *Gray E.G.* Electron microscopy of synaptic contacts on dendrite spines of the cerebral cortex // Nature. 1959. V. 183 P. 592–1593.

27. *Hanse E., Gustafsson B.* Postsynaptic, but not presynaptic, activity controls the early time course of long-term potentiation in the dentate gyrus // J. Neurosci. 1992. V. 12. P. 3226–3240.

28. *Lise M.F. et al.* Involvement of myosin Vb in glutamate receptor trafficking // J. Biol. Chem. 2006. V. 281. P. 3669–3678.

29. *Wang Z. et al.* Myosin Vb mobilizes recycling endosomes and AMPA receptors for postsynaptic plasticity // Cell. 2008. V. 135. P. 535–548.

30. *Lee S.J. et al.* Activation of CaMKII in single dendritic spines during long-term potentiation // Nature. 2009. V. 458. P. 299–304.

31. *Sabatini B.L., Oertner T.G., Svoboda K.* The life cycle of Ca^{2+} ions indendritic spines // Neuron. 2002. V. 33. P. 439–452.

32. *Saneyoshi T., Fortin D.A., Soderling T.R.* Regulation of spine and synapse formation by activity-dependent intracellular signaling pathways // Curr. Opin. Neurobiol. 2009. V. 20. P. 108–115.

33. *Okamoto K. et al.* Rapid and persistentmodulation of actin dynamics regulates postsynaptic reorganization underlying bidirectional plasticity // Nature Neurosci. 2004. V. 7. P. 1104–1112.

34. *Matsuzaki M. et al.* Structural basis of long-term potentiation in single dendritic spines // Nature. 2004. V. 429. P. 761–766.

35. *Murakoshi H., Wang H., Yasuda R.* Local, persistent activation of Rho GTPases during plasticity of single dendritic spines // Nature. 2011. V. 472. P. 100–104.

36. *Harvey Ch.D. et al.* The Spread of Ras activity triggered by activation of a single dendritic spine // Science. 2008. V. 321. P. 136–140.

37. *Abraham W.C., Williams J.M.* LTP maintenance and its protein synthesis-dependence // Neurobiol. Learn. Mem. 2008. V. 89. P. 260–268.

38. *Vlachos A., Maggio N., Jedlicka P.* Just in time for late-ltp: A mechanism for the role of pkmzeta in long-term memory // Commun. Integr. Biol. 2008. V. 1. V. P. 190–191.

39. *Newpher T.M., Ehlers M.D.* Glutamate receptor dynamics in dendritic microdomains // Neuron. 2008. V. 58. P. 472–497.

40. *Hinners I., Tooze S.A.* Changing directions: clathrin-mediated transport between the golgi and endosomes // J. Cell. Sci. 2003. V. 116. P. 763–771.

41. *Shanks N.F. et al.* Contribution of the global subunit structure and stargazin on the maturation of AMPA receptors // J. Neurosci. 2010. V. 30. P. 2728–2740.

42. *Малахин И.А. и др.* Влияние сборки транспортных везикул на процессы сохранения эффективности синаптической передачи // Вестник НГУ. 2012. Т. 10. С. 14–20.

Новые подходы к изучению высших когнитивных способностей животных

З.А. Зорина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
zorina_z.a@mail.ru

Гипотеза о наличии у животных зачатков мышления, которая долгое время была предметом ожесточенных дискуссий, мало-помалу теряет свою острую дискуссионность. По мере постепенного признания этой гипотезы наступает очередь анализа доказательств наличия этой стороны психики животных, которые становятся все более многочисленными и разнообразными. К настоящему времени показано, что животные способны к обобщенному и опосредованному отражению действительности, которое составляет основу мышления человека. Способность к этим операциям позволяет наиболее высокоорганизованным из них формировать отвлеченные довербальные понятия «число», «сходство», «больше» и др.

На основе развитых операций обобщения и абстрагирования у высших позвоночных появляется способность к символизации, т. е. к установлению тождества между предметами, действиями, явлениями или понятиями и исходно безразличными для субъекта знаками. Способность к символизации лежит в основе речи человека, а животным позволяет усваивать символы для маркировки некоторых предметов, действий, а также понятий. Шимпанзе и врановые, например, могут усвоить символы числительных и совершать с ними операцию сложения. В особых условиях воспитания и содержания антропоиды усваивают целые системы символов, составляющие простейшие незвуковые аналоги человеческого языка. Они используют их в общении с людьми и друг с другом, путем подражания перенимают часть знаков друг у друга (в том числе детеныши у родителей), применяют их для декларативных высказываний и (в очень ограниченной, зачаточной, степени) для сообщений о событиях прошлого и планов на будущее (подробнее см. [5]).

В ряде работ доказана способность антропоидов, а также врановых птиц и попугаев к таким операциям логического вывода, как транзитивное умозаключение, а также умозаключение по аналогии.

Наконец, одна из важнейших сторон мышления – способность к «отысканию и открытию существенно нового» (по формулировке А.В. Брушлинского), к экстренному (при первом же предъявлении) решению новых задач в ситуации, для выхода из которой нет «готового решения» (по определению А.Р. Лурия), также обнаружена у значительного числа видов позвоночных, а также у беспозвоночных [11]. Именно об этой стороне мышления животных пойдет речь в статье.

Можно упомянуть, что современные знания о мышлении животных достигнуты благодаря целому веку экспериментальных исследований. Их начало относится к 1914 г., когда была опубликована первая статья Н.Н. Ладыгиной-Котс о способности шимпанзе к обобщению и абстрагированию, а В. Келер [6] начал свои опыты на шимпанзе, позволившие ему описать инсайт – экстренное решение задачи на добывание приманки с помощью «орудий». Современные исследования мышления животных характеризуются применением двух основных подходов.

Комплексный подход – оценка когнитивных способностей вида или таксона производится на основе всего арсенала имеющихся методик, адресованных разным сторонам когнитивной деятельности.

Сравнительный подход – последовательное сопоставление данных о мышлении животных с разным уровнем структурно-функциональной организации мозга (сопоставление как внутри классов, так и между классами позвоночных, прежде всего птиц и млекопитающих).

Напомню, что данные о мышлении и других когнитивных функциях животных получены и продолжают поступать из двух источников:

1) наблюдения в природе (зоология, когнитивная этология). Именно благодаря этому источнику появилась гипотеза о наличии у животных мышления;

2) эксперименты в неволе (психология, физиология) – основной поставщик фактов и доказательств.

Результаты наблюдений и экспериментов дополняют и уточняют друг друга, причем в ряде случаев наблюдения за спонтанными проявлениями актов мышления в природе становятся прообразом лабораторных методик (задачи Крушинского [7], тест на транзитивное заключение и др.).

В этой статье я затрону только некоторые методические вопросы и новые данные об орудийной деятельности животных как одном из проявлений зачатков мышления у животных. Благодаря В. Келеру [6] «орудийные задачи» стали важнейшим инструментом для изучения этой стороны психики животных.

Как уже упоминалось выше, в процессе накопления фундаментальных данных о мышлении и других высших когнитивных функциях животных оформился ряд методологических принципов, необходимых при исследовании когнитивных способностей животных. К ним относится, прежде всего, необходимость применения комплексов разноплановых тестов, предназначенных для оценки разного рода ментальных операций (способность к экстренному решению новых задач

разных типов, к обобщению и абстрагированию, к операциям логического вывода и т. д.). Это помогает избегать случайностей в характеристике вида или таксона. Так, например, успешное решение того или иного теста может отражать не общий уровень развития когнитивной деятельности, а наличие той или иной частной специализации. В частности, изготовление орудий новокаледонской вороной пытались относить к проявлениям врожденной специализации, которая совершенствовалась вследствие подражания сородичам (культурная преемственность). Между тем исследование этих птиц с помощью комплекса разнообразных тестов показало, что они решают их успешно несмотря на глубокие отличия в их структуре от того, что эти птицы делают в природе. В целом по своему уровню эти птицы приближаются к человекообразным обезьянам, как и другие представители семейства врановых [25, 30, 31].

Напротив, неспособность голубей и кур к решению задачи на экстраполяцию пытались объяснять их узкой пищевой специализацией (употребление только неподвижного корма и отсутствие реакции на корм передвигающийся), однако многосторонние исследования их когнитивных способностей показывают, что это лишь одно из проявлений свойственного этим птицам невысокого уровня когнитивной деятельности, что они обладают очень ограниченными возможностями даже в ситуациях, где совершенно не требуется оценка свойств движущихся объектов [3, 29].

К настоящему времени принцип комплексного тестирования прослеживается в организации самого разного рода когнитивных исследований. В качестве новой тенденции можно отметить, что постепенно начинают применять эксперименты, проводимые по стандартным методикам, но непосредственно в естественных для вида условиях [8, 10, 13, 21]. Такой подход позволяет получать данные о животных, которые трудны для содержания в неволе. Кроме того, в естественных условиях могут проявиться какие-то дополнительные стороны когнитивной деятельности, которые невозможно заметить в условиях лабораторного эксперимента, обедненных по сравнению с естественной средой. Так, например, при исследовании способности к обучению и обобщению [8, 21], проводившемуся непосредственно в колонии серокрылой чайки (*Larus glaucescens*) на острове Топорков (Командорский ГПБЗ), была обнаружена, а затем изучена в эксперименте роль обучения путем наблюдения и подражания новым навыкам в формировании пищедобывательного поведения этих птиц [20].

Можно также отметить, что при оценке способности к употреблению орудий стали более регулярно привлекать результаты наблюдений за спонтанными проявлениями этой деятельности животных в природе или в условиях, приближенных к естественным [27, 28]. Это позволило выяснить, что употребление орудий в новой ситуации действительно характерно для поведения человекообразных обезьян всех видов и вносит реальный вклад в обеспечение адаптивности их поведения. Кроме того, аккумуляция таких данных демонстрирует неожиданно разнообразный и гораздо более широкий, чем это предполагалось, диапазон орудийных действий, причем с течением времени регулярно обнаруживаются все новые возможности этих приматов. Становится очевидным, что ситуации, в которых обычно проводят такие лабораторные исследования, не вскрывают всех потенциальных возможностей человекообразных обезьян.

2000–2010-е гг. ознаменовались также появлением ряда новых методик для тестирования когнитивных способностей животных. Не касаясь работ по изучению операций обобщения и символизации [4, 12], можно отметить появление новых типов задач, доступных экстренному решению.

Как известно, первым и наиболее важным доказательством наличия мышления были и остаются эксперименты, в которых животным предлагают так называемые «орудийные задачи» на добывание видимой, но физически недоступной приманки. Впервые примененные В. Келером [6], они претерпели ряд модификаций, которые делают их доступными для выполнения животными разных видов, в том числе слонами [22].

В частности, это направление развивают исследователи в Институте Макса Планка под руководством Дж. Колла. Многие авторы пытаются при этом проанализировать факторы, которые определяют успех решения, помогая животному уловить структуру задачи (см., например, [16, 17, 18, 26]. Одна из методик моделирует широко известное описание поведения во́рона, который в засуху до тех пор бросал камни на дно дупла, где было немного воды, пока ее уровень не поднялся достаточно, чтобы напиться. С подобной задачей (приманка-орех плавает на поверхности воды в узкой трубке, заполненной водой лишь на четверть) с первого же раза успешно справились как грачи [14], так и орангутаны и шимпанзе [19], с той лишь разницей, что приматам камней не давали, но они добивались нужного эффекта тем, что доливали в трубку воду, принесенную во рту из поилки.

Одна из тенденций развития этого направления состоит в необходимости создания универсальных орудийных задач, которые были бы доступны животным разных видов. Наряду с упомянутой выше этой цели могут служить и другие варианты задач с трубкой. Один из них был применен для изучения в лабораторных условиях прославившей новокаледонских ворон способности изготовлять и использовать крючки для добывания недоступной приманки – ведерка с кормом, помещенного на дно прозрачного узкого цилиндра, который можно вытащить только с помощью крючка [30]. К настоящему времени такую же задачу предложили только грачу, который успешно с ней справился, несмотря на полное отсутствие каких бы то ни было орудийных действий в поведенческом репертуаре этого вида. По своему дизайну и по структуре эта задача может использо-

ваться для оценки способностей разных видов животных.

Разрабатывается также задача на извлечение приманки из трубки с помощью поршня, что делает ее доступной для животных с ограниченными манипуляционными возможностями. В трубке, ориентированной горизонтально, имеются «ловушки» – отверстия в дне, через которые приманка может падать из трубки на пол или, наоборот, попадать в контейнер и делаться недоступной. Предусмотрен еще ряд особенностей дизайна, которые позволяют менять структуру задач (см. подробнее [2]). Однако для всех исследованных животных (врановые 3 видов, шимпанзе), а также для детей до 3 лет задача оказалась слишком трудна и требует методической доработки.

Вторая методологическая особенность изучения когнитивных функций – сравнительный подход – в настоящее время характеризуется постепенным расширением числа исследуемых групп, так что появляется возможность более последовательного и систематичного сравнения как внутри отдельных таксонов, так и разных таксонов между собой. Такое расширение также приводит к весьма принципиальным результатам. Например, до недавнего времени мы имели представление о высших достижениях интеллекта животных главным образом на основании данных о человекообразных обезьянах. Постепенно выяснилось, что сходными возможностями обладают и врановые птицы, что породило гипотезу о параллелизме эволюции этих таксонов [7, 15, 24 и др.].

Что касается других отрядов млекопитающих, то априорное представление об «уме дельфинов» последовательно подтверждается данными экспериментов. Помимо ранее описанной способности к формированию довербальных понятий, решению элементарных логических задач, усвоению простейшего аналога человеческого языка (см. [4, 5]) показано, что они могут узнавать себя в зеркале [23]. Эти данные, разумеется, нуждаются в повторении и дальнейшем анализе, однако наличие такой способности рассматривают как проявление зачатков самоосознания.

Не менее важные и перспективные данные получены при немногочисленных исследованиях способностей слонов – еще одного отряда млекопитающих с крупным и сложно организованным мозгом. Достаточно многообещающи данные о том, что, по крайней мере, некоторые особи решают маркировочный тест, т. е. тоже узнают себя в зеркале [22] подобно другим высшим млекопитающим и врановым птицам. Надо отметить, что до сих пор слоны мало попадали в поле зрения психологов и физиологов, однако в настоящее время ситуация заметно меняется. Разрабатываются адекватные для этих животных методики, что позволило, например, П. Фёрдеру обнаружить у них способность к инсайту и к обобщению в классическом орудийном тесте В. Келера на добывание удаленной приманки, а Д. Плотник [22] описал также проявление у них theory of mind при решении задач на кооперацию.

Расширение числа исследованных видов обогащает характеристику и внутри отдельных таксонов, в частности внутри класса птиц. До настоящего времени разносторонне исследованы только голуби, врановые и попугаи (благодаря работам I. Pepperberg), тогда как класс птиц включает сотни видов, относящихся к 23 отрядам. По характеру организации мозга голуби и врановые диаметрально противоположны. Например, полушарный индекс Портмана у голубей составляет менее 4, а у врановых около 16. Наряду с этим существует еще и огромное разнообразие видов с промежуточными характеристиками. Наши исследования птиц со «средними» показателями полушарного индекса (около 9) позволили дать качественную оценку их когнитивных способностей, описать спектры доступных им задач (подробнее [3]). Особенно продуктивным оказалось в этом случае применение комплекса так называемых протоорудийных задач (подтягивание приманки за прикрепленную к ней нить [1]). Именно благодаря включению в комплекс задачи с «разорванной» нитью удалось доказать, что клесты и лазоревки (птицы со средними значениями полушарного индекса) не улавливают суть задачи: они не отслеживают, какая из нитей действительно связана с приманкой. Они тянутся к самой приманке, дергая попутно ближайшую к ней нить, что и обеспечивает им довольно высокую долю правильных решений [9]. В отличие от них врановые птицы с такими задачами также справляются [1].

Упомянутые выше работы отражают лишь одно из направлений в изучении мышления животных. Сходные тенденции прослеживаются также и в работах, посвященных операциям обобщения и абстрагирования, поиска элементов сознания, когнитивным аспектам социального поведения и др.

Литература

1. *Багоцкая, М.С. и др.* Врановые способны понимать логическую структуру задач на подтягивание закрепленной на нити приманки // Журн. высш. нерв. деятельности. 2010. Т. 60, № 5. С. 543–551.
2. *Багоцкая, М.С. и др.* Изучение способности серых ворон (Corvus cornix L.) решать задачи на добывание приманки из трубки с ловушкой // Журн. общ. биологии. 2011. Т. 74, № 1. С. 110–116.
3. *Зорина, З.А., Обозова, Т.А.* Новое о мозге и когнитивных способностях птиц // Зоол. журн. 2011. Т. 90, № 7. С. 784–802.
4. *Зорина, З.А., Смирнова, А.А.* История и методы экспериментального изучения мышления животных // Современная экспериментальная психология. В 2 т. / под ред. В.А. Барабанщикова. М. : Институт психологии РАН, 2011. Т. 1. С. 61–87.
5. *Зорина, З.А.* Языковые» способности человекообразных обезьян // Историческая психология и социология истории. 2011. Т. 4, № 2. С. 56–84.
6. *Келер, В.* Исследование интеллекта человекоподобных обезьян. М. : Комакадемия, 1930. 206 с.
7. *Крушинский, Л.В.* Биологические основы рассудочной деятельности. Эволюционный и физиолого-генетический аспекты поведения. М. : Изд-во МГУ, 1977. 270 с.

8. *Обозова, Т.А. и др.* Экспериментальный подход к изучению когнитивных способностей птиц в естественной среде обитания: относительные оценки размера стимулов у серокрылых чаек // Орнитология. 2011. Вып. 36. С. 244–249.

9. *Обозова, Т.А. и др.* Сравнительная оценка способности разных видов птиц к решению протоорудийных задач // Зоол. журн. 2013. Т. 92, № 6. С. 1–11.

10. *Плескачева, М.Г. и др.* Методы оценки начальной ориентации и поведения на старте у мелких млекопитающих при ближнем хоминге // Труды ЗБС им. С.Н. Скадовского. 2011. Т. 5. С. 232–238.

11. *Резникова, Ж.И.* Интеллект и язык животных и человека : Основы когнитивной этологии. М. : Академкнига, 2005. 518 с.

12. *Смирнова, А.А.* О способности птиц к символизации // Зоол. журн. 2011. Т. 90, № 7. С. 803–810.

13. *Фирсов, Л.А.* Поведение антропоидов в природных условиях. Л. : Наука, 1977. 168 с.

14. *Bird, Ch.D., Emery, N.J.* Rooks Use Stones to Raise the Water Level to Reach a Floating Worm // Current Biology. 2009. V. 19, Iss.16. P. 1410–1414.

15. *Emery, N.J., Clayton, N.S.* Evolution of the avian brain and intelligence // Curr. Biol. 2005. V. 15, № 23. P. 946–950.

16. *Hanus, D., Call, J.* Chimpanzees infer the location of a reward based on the effect of its weight // Current Biology. 2008. V. 18. R370-372.

17. *Martin-Ordas, G. et al.* Tubes, tables and traps: great apes solve two functionally-equivalent trap tasks but show no evidence of transfer across tasks // Animal Cognition. 2008. V. 11. P. 423–430.

18. *Martín-Ordás, G. et al.* Barriers and traps: great apes' performance in two functionally equivalent tasks // Animal Cognition. 2012. V. 15. P. 1007–1013.

19. *Mendes, N.* Raising the level: orangutans use water as a tool // Biol. Lett. 2007. № 3. P. 453–455.

20. *Obozova, T.A. et al.* Observational Learning in a Glaucous-winged Gull Natural Colony // International Journal of Comparative Psychology. 2011. V. 24. P. 226–234.

21. *Obozova, T.A. et al.* Relational Learning in Glaucous-Winged Gulls (*Larus glaucescens*) // The Spanish Journal of Psychology. 2012. V. 15, № 3. P. 873–880.

22. *Plotnik, J.M. et al.* Self-recognition in an Asian elephant // PNAS. 2006. V. 103, № 45. P. 17053–17057.

23. *Reiss, D., Marino, L.* Mirror self-recognition in the bottlenose dolphin: A case of cognitive convergence // PNAS. 2001. V. 98. P. 5937–3942.

24. *Seed, A.M. et al.* Convergent evolution of intelligence in corvids and apes : Invited peer-reviewed chapter in "Ethology and cognition in primates and other animals". 2008.

25. *Taylor, A.H. et al.* Do New Caledonian crows solve physical problems through causal reasoning? // Proc. R. Soc. 2009. January 22. V. 276. P. 247–254.

26. *Tomasello, M., Call, J.* Methodological challenges in the study of primate cognition // Science. 2011. V. 334. P. 1227–1228.

27. *Vancatova, M.A.* Tool use activity of captive gorillas [Орудийная деятельность горилл в неволе] // Пятая Межд. конф. по когнитивной науке, 18–24 июня 2012 г., Калининград, Россия : Тезисы докладов. 2012. С. 556–558.

28. *Vancatova, M.A.* Tool behaviour in higher primates // Вестник НГУ. Серия: Психология. 2008. Т. 2, №. 2. С. 61–69.

29. *Wasserman, E.A., Zentall, T.S. (eds.).* Comparative cognition. Experimental exploration of animal intelligence. Oxford University press, 2006. 704 p.

30. *Weir, A.A.S. et al.* Shaping of hooks in New Caledonian Crows // Science. 2002. V. 297, № 5583. P. 981–3.

31. *Wimpenny, J.H. et al.* Cognitive Processes Associated with Sequential Tool Use in New Caledonian Crows // PLoS ONE. 1 Aug. 2009. V. 4, Iss. 8. e6471. URL : www. plosone.org.

Компьютерное моделирование динамики альтернативных комплексов космофизических показателей, определяющих «спокойные» и «тревожные» дни относительно возникновения сосудистых заболеваний (на примере случаев инсульта в конкретном географическом регионе)

В.П. Карп[1], Ю.А. Саяпина[1], Л.Г. Хетагурова[2], Н.К. Ботоева[2]

[1]Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики
[2] Институт биомедицинских исследований Владикавказского научного центра РАН
и Правительства Республики Северная Осетия – Алания
karpvica@mail.ru

Актуальность проблемы исследования

До настоящего времени одной из актуальных и нерешенных проблем медицины и космобиологии остается проблема оценки степени влияния космофизических показателей (КФП) – факторов воздействия – на возникновение тех или иных сосудистых заболеваний (СЗ). Было замечено, что в некоторые дни (или периоды) года число больных, поступивших в клинику с СЗ, значительно возрастало по отношению к другим, спокойным дням.

Сложилось предположение о наличии имеющейся (но не очевидной) связи интенсивности СЗ с некоторыми космофизическими и метеорологическими показателями. Факт наличия влияния КФП на функциональное состояние не только больных, но и практически здоровых людей уже не вызывает сомнений, поскольку подтвержден большим объемом наблюдений [1, 2, 3, 4].

Однако до последнего времени не удалось выявить какой-либо космогеофизический фактор, оказывающий преимущественно решающее влияние на организм человека. Причин отсутствия ожидаемого результата многие авторы [1] указывают несколько: крайне малые амплитуды вариаций факторов воздействий, которые могут проявляться не напрямую, а опосредованно, через сложную систему нелинейных резонансов; высокая взаимная согласованность всех факторов земной внешней среды, проистекающая из общей зависимости от процессов на Солнце; а также нелинейность отклика самого биологического объекта и его полиреакционность на воздействие. Установлено, например, что на идентичные воздействия одного и того же фактора в разные моменты времени наблюдались неодинаковые, вплоть до знака, реакции [1]. Было сделано обоснованное предположение, что состояние биологического организма определяется не только отдельно рассматриваемым фактором, но и, в первую очередь, совокупностью значений каждого из них [1, 5, 6].

Обобщенный анализ научных результатов, полученных к концу 90-х годов XX века, побудил исследователей рассматривать биологический организм не просто как сложную систему, находящуюся в состоянии сохранения устойчивого равновесия (гомеостаза) с выраженными причинно-следственными связями и линейным характером отклика на воздействие внешних факторов, а как сложную нелинейную динамическую систему, осуществляющую процессы самоорганизации в неустойчивом динамическом равновесии потоков массы, энергии и информации вблизи состояний фазовых переходов [1, 4].

С новых научно-познавательных позиций оценка ситуации относительно возможностей и требований к решению фундаментальных и прикладных задач, связанных с изучением влияния КФП на организм человека, определила необходимость принципиального обновления и постановки самих задач исследования, и методов и средств их решения. Основная перспектива успеха в формировании новых научных и практических знаний в этой области выстраивается на многоаспектном сочетанном использовании современных методов и средств, опирающихся на принципы синергетики и «машинного обучения на примерах», методов искусственного интеллекта, когнитивной семантики и интеллектуального анализа данных (МИАД), методов компьютерного моделирования и создания систем поддержки принятия решений (СППР) [7, 8, 9, 10].

Одной из чрезвычайно важных и актуальных задач фундаментальной и практической медицины остается необходимость установить, какие именно космофизические показатели и в каком сочетании своих значений могут оказывать решающее влияние на состояние здоровья людей и у какого контингента пациентов они могут провоцировать развитие острых сосудистых заболеваний, в том числе инсультов. При этом одним из главных вопросов остается необходимость выяснить, чем, какими клиническими показателями отличается контингент больных СЗ, катастрофически зависимых от изменяющихся факторов КФП, от другого контингента больных СЗ, устойчивых к воздействию этих факторов.

Цели и задачи исследования

Целью проведенного исследования явилась разработка методов и средств компьютерного моделирования для изучения характера динамики

различных КФП и выявления прогностически значимых комплексов их значений относительно возникновения ситуаций, провоцирующих то или иное конкретное заболевание. Исследование проведено на примере задачи «КФП-инсульт».

Решение сформулированной проблемы исследования «КФП-инсульт» принадлежит классу задач принятия решений относительно сложно организованных многопараметрических динамических объектов в ситуации неопределенности. Решение задач этого класса требует не только достижения удовлетворительного конечного результата проведенного исследования, но и четкой вразумительной аргументации и интерпретации на профессиональном языке пользователей полученных результатов (как конечных, так и промежуточных), важных для формирования новых профессиональных знаний [7, 9, 10, 11].

Решение задач, заключающихся в необходимости определить прогностически значимые космофизические показатели (КФП) и их комплексы относительно имеющихся фактов конкретного заболевания, реализуется двумя последовательными этапами исследований.

Первый этап предусматривает выявление среди всех возможных (зарегистрированных) космофизических показателей такие комплексы, сочетания значений которых часто встречаются в те даты, когда наблюдается факт инсульта; и такие комплексы, которые характерны для дат без инсульта. В такой формулировке задача сводится к построению диагностических правил (ДП) альтернативной классификации, различающих объекты двух множеств, представленных значениями КФП. Следует, однако, заметить, что отсутствие сведений о случае заболевания (в конкретную дату) не может быть однозначно принято, как «не было факта заболевания». Это обстоятельство требует проведения дополнительной «экзаменационной» проверки на реальных данных.

На следующем, втором этапе предусматривается изучение связей клинико-биологических показателей, способных отобразить реакцию организма конкретных пациентов на динамику КФП-факторов в предшествующие дни наблюдения. Успешное решение этой задачи в большой степени будет способствовать решению другой, не менее важной, – прогнозированию отклика организма пациента на возникающие КФП-ситуации. Решение задач второго этапа стартует позже, после подтверждения требуемой эффективности использования ДП на реальном контрольном материале.

Материал исследования

Материал исследования составили сведения о зарегистрированных случаях инсультов различной степени тяжести за 2010 год (365 дней) в конкретном климатическом регионе (г. Владикавказ). В случае двух и/или более инсультов в один и тот же день (у разных людей) дата тиражировалась на количество инсультов с соответствующим вариантом исхода. В итоге материал исследования представлен 524 объектами.

Исходно календарные даты были представлены тремя группами объектов по классам «состояний»:

класс «0» – даты, в которых отсутствуют сведения о случаях инсульта (192 объекта);

класс «1» – даты, в которых зафиксированы факты инсульта с положительным исходом (262 объекта);

класс «2» – даты, в которых зафиксированы факты инсульта с летальным исходом (70 объектов).

Объекты класса «0» были семантически определены как «спокойные» дни относительно возникновения инсультов; объекты классов «1» и «2» – «тревожные» дни относительно возникновения инсультов. Однако для первого варианта решения задачи было принято решение объединить классы «1» и «2» в общий класс – исход «1 v 2» (332 объекта), который семантически означает факт инсульта (без уточнения типа). В таком варианте задача сводится к построению такого набора характеристик (ДП), который бы отличал «спокойные» даты от «тревожных». В дальнейшем предполагается решать задачу прогнозирования, отличая исход «1» от исхода «2».

Космофизические показатели (23 показателя) были представлены тремя группами:

показатели Солнца (7) – число солнечных пятен, знак межпланетного магнитного поля, поток радиоизлучения, плотность потока излучения, рентгеновский класс радиовспышки, класс радиовспышек, индекс солнечной активности;

показатели Земли (9) – индекс геомагнитной активности, *X*-вектор магнитного поля, *Y*-вектор магнитного поля, *Z*-вектор магнитного поля, температура воздуха (T^0), атмосферное давление, влажность, облачность, скорость ветра;

индексы патогенности (7) – T^0, межсуточного изменения T^0, изменения атмосферного давления, влажности, облачности, ветра, суммарная метеорологическая патогенность.

Клинико-биологические показатели больных инсультом представлены признаками: пол, возраст, тип инсульта, время суток госпитализации (4 показателя). На данном этапе исследования клинико-биологические признаки больных не участвовали; они будут использованы позже, на этапе прогнозирования реакции организма пациентов на динамику КФП-факторов.

Целью первого этапа исследования явилось изучение характера динамики различных КФП для выявления прогностически значимых комплексов их значений (ДП) относительно возникновения ситуаций, провоцирующих инсульты.

Для достижения обозначенной цели требовалось решить следующие задачи:

1) провести анализ исходного материала исследования и формализовать базу данных;

2) сформировать классы «обучения» и «контроля»;

3) провести предварительный «разведочный» анализ исходных данных: построить годовые посуточные графики признаков – показателей КФП,

графики и диаграммы распределения случаев инсульта (по неделям) года;

4) построить производные характеристики с использованием семантического подхода, построить гистограммы распределения объектов по интервалам значений признаков, выбрать информативные интервалы разбиения значений признаков;

5) сформировать проблемно-ориентированную базу данных (ПОБД) по задаче исследования;

6) провести машинное обучение «на примерах» и построить диагностические (прогностические правила ($ДП_{«0»}$ и $ДП_{«1v2»}$), характерные для каждого из выделенных классов «0» и «1v2», с использованием системы поддержки принятия решений (СППР) «Consilium» [10, 12, 17, 18].

Методы решения поставленных задач

Для решения перечисленных задач были использованы современные методы интеллектуального анализа данных (МИАД), предусматривающие семантический подход к описанию динамики космофизических показателей, приемы визуализации характера динамики каждого показателя, выявления диапазона значений и др. Разработаны алгоритмы преобразования значений каждого исходно заданного признака (в каждую текущую дату) в дополнительные характеристики, представленные в форме семантического описания их динамики – «что видит глаз» – по трем предшествующим датам [7, 10, 12].

Для построения пространства признаков, перспективных относительно поставленной задачи, было предложено использовать семантический подход к описанию характера динамики космофизических показателей. Для выявления скрытых взаимосвязей КФ-показателей были использованы современные методы интеллектуального анализа данных (МИАД), в частности принцип «машинного обучения на примерах», который позволяет выявлять особенности временной структуры сложно организованных динамических объектов, по разному влияющих на состояние организма человека [2, 5, 6].

Решение поставленных задач предусматривает выполнение следующих этапов: построение графиков динамики исходных показателей, построение производных характеристик, построение гистограмм распределения объектов по интервалам значений показателей, выбор информативных интервалов значений признаков. Затем по первоначально заданным признакам и сформированным на их основе производным характеристикам (ПХ) необходимо сформировать проблемно-ориентированную базу данных (ПОБД) для машинного обучения и построения прогностических правил с помощью системы поддержки принятия решений (СППР) «Consilium» [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Для содержательного, семантического отображения характера динамики каждого КФП был выбран 3-дневный предшествующий период наблюдения и использован семантический подход к конструированию прогностически перспективных «производных характеристик» (ПХ).

В результате проведенного «разведочного» исследования были сконструированы прогностически перспективные производные характеристики динамики значений каждого КФП относительно трех предшествующих дней: максимальное изменение каждого показателя за три предшествующих дня; «относительная максимальная разница» – максимальная разница значений, отнесенная к значению показателя в текущую дату; и «характер динамики», словесно описывающий динамику показателя. Поиск скрытых закономерностей – построение альтернативных комплексов, отличающих «спокойные» даты (без инсультов) от «тревожных» дней (с инсультом) – проводился по отдельным группам показателей – Солнца, Земли и индексов патогенности, и в совокупности их различных сочетаний [9].

На сформированном пространстве производных признаков динамики КФП – ПХ КФП, используя принцип машинного обучения на примерах (методом перебора конъюнкций), были выявлены диагностически значимые взаимосвязи между значениями различных КФП, оказавшихся характерными для каждого из различаемых классов (исходов) – дней с высокой вероятностью возникновения инсульта (класс «тревожных» дней) и дней с малой вероятностью инсульта (класс «спокойных» дней).

В докладе приводятся обоснование выбора наиболее информативных (из исходных и сгенерированных) показателей, оценки информативности ДП, построенных на различных комбинациях признаков, результаты проведенного «обучения» системы и оценки ее эффективности на «контрольном» материале, приводятся оценки мощности построенных диагностических правил в прогнозировании опасных КФП-ситуаций. Демонстрируется один из вариантов семантического представления новых профессиональных знаний, сформированных в виде кластеров ДП [17]. Подтверждена перспективность выбранного подхода.

Литература

1. *Чибисов С.М., Рагульская М.В.* Современные аспекты астрохронобиологии // Хронобиология и хрономедицина : руководство / под ред. С.И. Раппорта, В.А. Фролова, Л.Г. Хетагуровой. М. : Медицинское информационное агентство, 2012. С. 159–190.

2. *Карп В.П.* Формирование новых знаний в хронобиологии и хрономедицине с использованием современных методов интеллектуального анализа динамических данных // Хронобиология и хрономедицина : руководство / под ред. С.И. Раппорта, В.А. Фролова, Л.Г. Хетагуровой. М. : Медицинское информационное агентство, 2012. С. 252–283.

3. *Рапопорт С.И.* Мелатонин в профилактике метеопатических реакций // Влияние космической погоды на человека: в космосе и на Земле : международная конференция : тез. докл. М., 2012. 43 с.

4. *Бреус Т.К.* Формирование ритмической структуры биологических объектов в процессе эволюции // Влияние космической погоды на человека: в космосе и на Земле : международная конференция : тез. докл. М., 2012. 45 с.

5. Построение решающих правил в исследовании динамики космофизических показателей с целью прогнозирования ситуаций, провоцирующих возникновение эпизодов инсульта / Карп В.П., Саяпина Ю.А., Хетагурова Л.Г. и др. // Здоровье и образование в XXI веке : журнал научных статей. М. : РУДН, 2012. Т. 14 (1). С. 221–222.

6. *Карп В.П., Хетагурова Л.Г., Ботоева Н.К., Саяпина Ю.А.* Изучение влияния космофизических факторов на возникновение ситуаций, провоцирующих сосудистые заболевания // Новые технологии в рекреации здоровья населения : материалы V региональной научно-практической конференции. Владикавказ, 2012. С. 191–196.

7. *Кобринский Б.А.* К вопросу о формальном отражении образного мышления и интуиции специалиста слабо структурированной предметной области // Новости искусственного интеллекта. 1988. № 3. С. 64–76.

8. *Карп В.П.* Вычислительные методы анализа временных рядов в хронобиологии и хрономедицине. М. : МИРЭА, 2002. 87 с.

9. *Карп В.П.* Интеллектуальный анализ данных в проблеме построения решающих правил классификации (на примере задач медицинской диагностики) // Новости искусственного интеллекта. 2006. № 2. С. 57–75.

10. *Чернавский Д.С., Карп В.П., Родштат И.В., Никитин А.П., Чернавская Н.М.* Распознавание. Аутодиагностика. Мышление. Синергетика и наука о человеке. М. : ИПРЖР, 2004. 272 с.

11. *Попов Э.В., Фоминых И.Б., Кисель Е.Б., Шапот М.Д.* Статические и динамические экспертные системы. М. : Финансы и статистика, 1996.

12. *Карп В.П., Катинас Г.С.* Вычислительные методы анализа в хронобиологии и хрономедицине. СПб. : Восточная корона, 1997. 116 с.

13. *Карп В.П.* Методы и средства контроля и диагностики сложноорганизованных объектов. М. : МИРЭА, 2008. 199 с.

14. Семантический подход в исследовании динамики космофизических показателей с целью прогнозирования ситуаций, провоцирующих возникновение эпизодов инсульта / Саяпина Ю.А., Карп В.П. Хетагурова Л. Г. и др. // Математика. Компьютер. Образование : международная конференция : тез. докл. М., 2012. 65 с.

15. Методы интеллектуального анализа данных в исследовании динамики космофизических показателей с целью прогнозирования ситуаций, провоцирующих возникновение эпизодов инсульта / Саяпина Ю.А., Карп В.П., Хетагурова Л.Г. и др. // Сборник трудов 61 НТК МИРЭА. М., 2012. Ч. 1 : Информационные технологии и системы. Вычислительная техника. 45 с.

16. Изучение динамики космофизических показателей для прогнозирования ситуаций, провоцирующих сосудистые заболевания у людей / Карп В.П., Хетагурова Л.Г., Саяпина Ю.А. и др. // Вестник РУДН. Серия «Медицина». М. : РУДН, 2012. №7. С.116–117.

17. *Карп В.П., Саруханов Б.А.* Методы искусственного интеллекта в проблеме расширения профессиональных знаний специалиста // Научный вестник МИРЭА. 2013. № 1 (13). С. 9–22.

18. Программа для ранжирования непрерывных признаков (Rang) : автор. свидетел. / Карп В.П., Батоврин В.К., Мандрыкин А.М., Никитин А.П. Российское агентство по патентам и товарным знакам (РОСПатент). Св-во № 200261154. 2002.

Модели местной нервно-мышечной регуляции сосудистой системы

Б.Н. Клочков

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
boris51122@gmail.com

В стенку сосудов биоткани входят гладкомышечные волокна, благодаря активности которых происходит изменение просвета и, как следствие, регуляция тока биожидкости [1–8]. Активное напряжение зависит от радиуса сосуда, в результате статическая характеристика давление – радиус может приобрести немонотонный характер, причем сосуды могут обладать несколькими равновесными радиусами при фиксированном трансмуральном давлении. В результате возможно существование динамических автоструктур пористости в ткани и распространение в сосудах перепадных автоволн просвета сосуда (волн сокращения-расширения) [9–15]. Благодаря этому могут происходить транспортные эффекты крови, лимфы и др. Активно-мышечные механизмы транспорта особенно важны для переноса биожидкости в системе, где отсутствует внешний насос, создающий градиент давления. Для сосудов автоволны могут осуществлять существенную прокачку.

Рассмотрим динамику ткани с активной сосудистой микроструктурой. Используем континуальную модель пространственно неоднородного распределения кровозаполнения тканей. Справедливы уравнения неразрывности обеих фаз (кровь и активный упругий тканевой каркас) и их движения. Учитывается фильтрационный закон Дарси. Предполагается, что фазы и среда в целом несжимаемы, плотности фаз равны. Межфазный переток отсутствует. Пренебрежем инерционными слагаемыми, процессы достаточно медленные. Имеется сильно разветвленная сеть кровеносных микрососудов с мышечными волокнами разного калибра, переплетенных так, что в среднем по малому объему среды скорость фазы крови близка скорости твердой фазы, хотя вдоль любого сосуда скорость тока крови существенно отлична от скорости окружающей ткани. Изотропное активное напряжение ткани γ связано с гладкомышечными клетками стенки сосудов и со скелетной нервно-мышечной управляемой системой. Возможны разные случаи нелинейной активной функции γ в зависимости от деформации каркаса ε, давления жидкости p, сдвигового напряжения и др.

Рассмотрим случай $\gamma = \gamma(\varepsilon)$. В результате получим нелинейное уравнение относительно пористости φ (объемного содержания крови $\varphi \sim \varepsilon$). Рассмотрим одномерный случай

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right), \quad D = D(\varphi, \eta, k, E, \gamma), \quad (1)$$

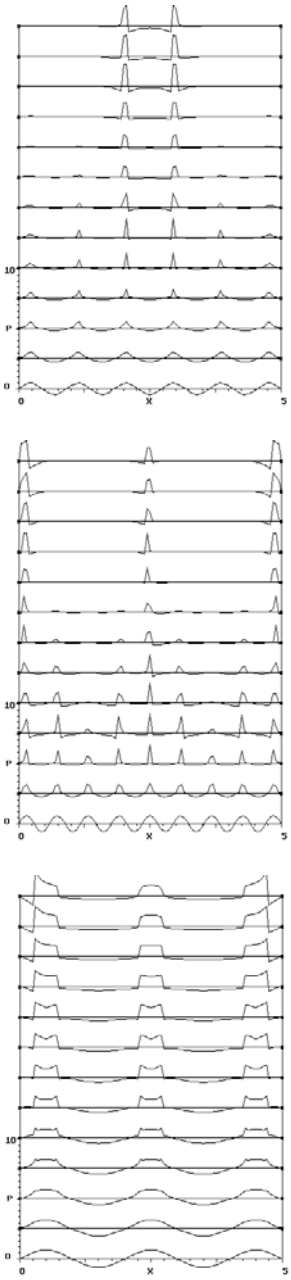
где η – вязкость жидкости, k – эффективная проницаемость ткани по отношению к крови; E – коэффициент упругости твердой фазы, γ – параметр активности. При этом можно принять аппроксимацию финитной колоколообразной зависимости $\gamma(\varphi)$ в виде кусочно-параболической или кусочно-линейной функции. В зависимости от знака и величины γ_φ' коэффициент D может быть как положительным, так и отрицательным. Последний случай ($D < 0$) имеет место, если уровень активности среды достаточно высок и рабочая точка находится на падающем участке кривой $\gamma(\varphi)$.

Проведем анализ уравнения в нелинейной задаче. Можно показать прямым интегрированием его по всей оси x от $-\infty$ до $+\infty$, что справедливы инварианты по времени t для достаточно общих финитных зависимостей $\varphi(x, t)$ и $\gamma(\varphi)$: $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi dx =$ $= C_0 = \text{const}$ (площадь под кривой $\varphi(x)$ сохраняется в любой момент времени), $\int_{-\infty}^{+\infty} x\varphi dx = C_1 = \text{const}$ (центр тяжести $\varphi(x)$ сохраняется, несмещение кривой). Моменты более высокого порядка, вообще, не константы. Резкие «пятна» как бы вырастают антидиффузионно из начальных условий (режимы с обострением).

Рассмотрены динамические диссипативные автоструктуры распределения кровотока в ткани с помощью численных расчетов. Численные решения уравнения дают процесс изменения распределения φ при различных условиях (рис. 1). Использована зависимость $D(\varphi)$ в виде непрерывной функции. Кривые на рисунках – безразмерные, идут снизу вверх. Получены динамические пространственные структуры. Выявлена зависимость ширины импульса от начальной амплитуды: чем больше амплитуда начального распределения, тем больше длительность итогового импульса. Имеют место эффекты обострения импульса, а при определенных условиях – уплощения с прогибом в середине, а также мелкомасштабность. Может происходить удвоение импульса. Реализуется эффект локализации в середине (пропадание концевых импульсов – рис. 1, *а*) или выпадение пика (пропадание промежуточных импульсов – рис. 1, *б*). Возможны реализации острых импульсов (постепенное обострение без выпадения и без локализации) или тупых импульсов (уплощение – рис. 1, *в*). Предложенное модельное описание соответствует наблюдениям на ткани и может быть использовано для исследования функционирования сосудистой периферии кровоснабжающейся ткани.

Таким образом, в приближении двухфазной среды (кровь и нелинейно активный упругий микрокаркас) представлена континуальная модель пространственно неоднородного распределения крови в ткани, включая механизмы гладкомышечной регуляции микрососудов. С учетом фильтра-

ции справедливо нелинейное уравнение относительно объемного содержания крови (пористости), и найдены интегралы сохранения. Аналитически и численно описано существование диссипативных автоструктур самоорганизации кровоснабжения (сложные пятна на ткани) и динамика процесса эволюции начальных возмущений.



а *б* *в*

Рис. 1. Динамические автоструктуры кровоснабжения мягкой ткани φ(*x*, *t*): *а* – локализация, *б* – выпадение, *в* – уплощение

Предлагается эволюционная нелинейная математическая модель активного цилиндрического сосуда. Рассматриваются достаточно медленные процессы, использовано безынерционное приближение, причем сосуд тонкостенный, материал его стенки несжимаем. Основное уравнение имеет вид

$$\frac{(2\mu-\gamma_1)\varepsilon}{R_0}+\frac{\gamma_2\varepsilon^2}{2R_0}+\frac{2\mu_l}{R_0}\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}-T_1R_0\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial x^2}=0\,. \quad (2)$$

Здесь основной переменной является деформация $\varepsilon = (R - R_0)/R_0$, причем $R(x,t)$ – текущий внутренний радиус, R_0 – недеформированный радиус, μ – модуль сдвига материала стенки, μ_l – коэффициент вязкости материала стенки, T_1 – коэффициент, включающий продольное натяжение и упругий модуль, ось x направлена вдоль органа, t – время. Параметры активного напряжение (линейный γ_1 и нелинейный γ_2) появляются из-за наличия в стенке слоя возбужденных миоэпителиальных клеток. При этом перепад давления вдоль трубки мал, мала скорость течения биожидкости.

Введем безразмерные время τ, пространство y, переменную δ и параметр A:

$$t = t_*\tau,\quad t_* = 2\mu_l/\mu,\quad x = x_*y,\quad x_*^{\,2} = T_1R_0^{\,2}/\mu,$$

$$\delta = \varepsilon\gamma_2/[2(\gamma_1 - 2\mu)],\quad A = (\gamma_1 - 2\mu)/\mu.$$

Исследуем данную модель активного трубчатого сосуда (2) на основе уравнения в частных производных в безразмерном виде. Рассмотрим нелинейный режим. Для стационарных волн (решение зависит от автомодельной бегущей переменной z) уравнение сводится к нелинейному обыкновенному уравнению. В этом случае решения уравнения выглядят следующим образом (D – постоянная):

$$\delta(y,\tau) = 1/(1 + De^z)^2,\ z = -(5/6)A\tau \pm (A/6)^{1/2}y\ \ (A > 0)$$

$$\delta(y,\tau) = (1 + 2De^z)/(1 + De^z)^2,$$

$$z = -(5/6)A\tau \pm (-A/6)^{1/2}y\quad (A < 0).$$

Это связано с автоволновой природой неустойчивости на нелинейной стадии. Графически решения представлены на рис. 2.

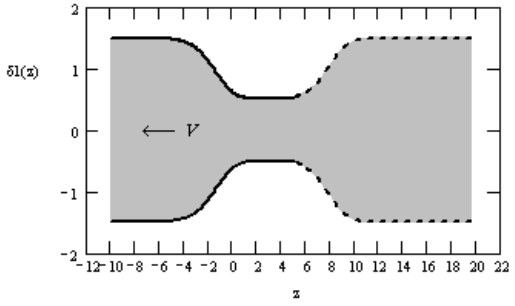


Рис. 2. Перепадные автоволны просвета трубки в безразмерных переменных: фаза волнового сокращения (прокачки) – сплошная кривая, фаза волновой релаксации (восстановления) – штриховая кривая. Безразмерная скорость автоволны $V = 5(\pm A/6)^{1/2}$, $D = 2$, $\delta_1(z) = \delta(z) + 0{,}5$

Выражения для размерной скорости V_r распространения автоволны и для размерной характерной ширины l_r фронта автоволны по пространственной координате x имеют следующий вид (их произведение не зависит от активности: $V_r\, l_r = 5R_0^{\,2}/4\theta$, где $\theta_1 = \mu_l/\sqrt{\mu T_1}$, $\theta = \mu_l/T_1$ – характерные времена пассивной релаксации радиуса):

$$V_r = \frac{5R_0\sqrt{A}}{4\sqrt{6}\theta_1},\quad l_r = R_0\sqrt{\frac{6T_1}{\mu A}}\,.$$

Максимальная относительная величина ε_m перепада радиуса R сосуда в автоволне определяется формулой $\varepsilon_m = (R_0 - R)/R_0 = 2\mu A/\gamma_2$. Здесь R_1 и R_0 – минимальный и максимальный радиусы трубки в волне. Автоволновой режим, близкий к описанным стационарным формулам, осуществляется в достаточно длинной трубке, когда ее длина L существенно больше характерной ширины фронта волны l_r ($L >> l_r$).

Данные волны экспериментально наблюдались на сердце асцидии. В экспериментах Головко с соавт. получены значения скорости распространения волны изменения диаметра трубки: 4 мм/с. Из представленных выражений для $l_r \approx R_0 \approx 0{,}5$ мм, $\theta \approx 0{,}15$ с получаем $V_r \approx 4{,}2$ мм/с. Параметры автоволны достаточно близки наблюдаемым.

При распространении автоволны вдоль трубки его содержимое выдавливается этой волной. Подсчитаем производительность g_r такого активного насоса, вызванного распространяющейся механической автоволной сжатия трубки. Она вычисляется при помощи уравнения неразрывности. Тогда получить численную оценку величины производительности насоса g_r можно следующим образом: $g_r = \pi V_r (R_0^2 - R_1^2) = 2{,}4$ мм^3/с при $V_r = 4$ мм/с, $R_1 = 0{,}25$ мм и $R_0 = 0{,}5$ мм. То есть волна может давать существенный прокачивающий эффект.

Рассмотренная математическая модель является достаточно точным приближением, позволяющим описать возникновение и распространение акустомеханической активной волны. Показано существование автоволны перепадного типа (сокращения и расширения) в трубке. Описанный механизм данного активного движения способен осуществлять важную значительную прокачку. Получен эффект нелинейного транспорта биологической жидкости. Представлена нелинейная модель распределения кровотока или лимфотока в схлопывающемся микрососуде, описывающая перепадную автоволну его просвета. При этом справедливы аналитические выражения для скорости распространения сжатия (расширения) сосуда и его формы, оценки которых близки измеряемым в экспериментах, причем соответствующие изменения давления малы, отраженной волны не возникает в отличие от миогенного микрососуда. Имеют место насосные эффекты перистальтического транспорта биожидкости с существенной прокачкой для вен и лимфососудов. Описаны аналитические и численные решения нелинейных уравнений, моделирующих течение крови в миогенном микрососуде, и ее нелинейная автоподкачка. Выражение для частоты распределенных автоколебаний достаточно универсально. При увеличении бифуркационного параметра от границы неустойчивости решение выходит на режим квазистационарных автоволн локального изменения радиуса и расхода, но перепадного давления.

Литература

1. *Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У.* Механика кровообращения. М. : Мир, 1981. 624 с.

2. Физиология кровообращения: Физиология сосудистой системы. Л. : Наука, 1984. 656 с.

3. *Fung Y.C.* Biodynamics. Circulation. New York : Springer-Verlag, 1984. 404 p.

4. *Парашин В.Б., Иткин Г.П.* Биомеханика кровообращения. М. : МГТУ, 2005. 224 с.

5. *Лебедева Е.А., Артеева Н.В., Головко В.А.* Различия в чувствительности к лидокаину натриевых каналов клеток синусно-предсердного узла у кролика и мыши // IV Съезд биофизиков России. Симпозиум I : Физико-химические основы функционирования биополимеров и клеток (20–26 августа 2012) : Материалы докладов. Н. Новгород : ННГУ, 2012. С. 173.

6. *Орлов Р.С., Борисов А.В., Борисова Р.П.* Лимфатические сосуды. Л. : Наука, 1983. 254 с.

7. *Ohhashi T., Azuma T., Sakaguchi M.* // Amer. J. Physiol. 1980. V. 239, № 8. P. H88–H95.

8. *Фолков Б., Нил Э.* Кровообращение. М. : Медицина, 1976. 464 с.

9. *Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С.* Математическое моделирование в биофизике. Введение в теоретическую биофизику. Изд. 2. М.; Ижевск : ИКИ, 2004. 472 с.

10. *Клочков Б.Н.* О моделях течения жидкости в микрососудах // Коллективная динамика возбуждений и структурообразование в биологических тканях. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. С. 156–164.

11. *Клочков Б.Н., Кузнецова Е.А.* Активные волновые процессы в схлопывающихся сосудах и эффекты транспорта // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 9. С. 793–800.

12. *Клочков Б.Н., Рейман А.М.* Самоорганизационные процессы кровоснабжения в биологических тканях // Нелинейные волны. Синхронизация и структуры : Междунар. школа по нелинейным явлениям (5–16 сентября 1995). Н. Новгород : ННГУ, 1995. Ч. 2. С. 111–118.

13. *Клочков Б.Н., Елисеева Ю.Ю., Шилягин П.А.* Распространение низкочастотных волн в биологических тканях и сосудах // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 4/5. С. 506–515.

14. *Клочков Б.Н., Рейман А.М.* Нелинейные модели динамики кровоснабжения участка ткани // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18, № 2. С. 131–141.

15. *Клочков Б.Н.* Волновые процессы на клеточном уровне // Акустический журнал. 2011. Т. 57, № 2. С. 259–271.

Акустические воздействия и хаотическая динамика тремора

В.В. Козлова, Ю.В. Романова, Д.Ю. Филатова, В.Н. Ватамова, Д.А. Дегтярев

Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, Сургут
karmacurator@mail.ru

Исследование параметров движения вектора $x = x(t) = (x_1, x_2, \ldots, x_m)^T$ организма человека в фазовом пространстве состояний производилось методами теории хаоса и самоорганизации (ТХС), в рамках которого нами идентифицировались параметры квазиаттракторов (КА), которые существенно отличаются у учащихся разных возрастных групп. Объектом для наблюдения стали 30 студентов (15 девушек и 15 юношей), обучающихся на 1–3 курсах ГБОУ ВПО «Сургутский государственный университет ХМАО – Югры». Обследование студентов производилось неинвазивными методами и соответствовало этическим нормам Хельсинской декларации (2000 г.). Работа выполнялась в рамках плана научных исследований лаборатории «Функциональные системы организма человека на Севере» при Научно-исследовательском институте биофизики и медицинской кибернетики и поддержана темой НИОКР «Исследование поведения функциональных систем организма человека на Севере РФ методами многомерных фазовых пространств состояний» (№ 01200965147). Критерии включения: возраст студентов 17–20 лет; отсутствие жалоб на состояние здоровья в период проведения обследований; наличие информированного согласия на участие в исследовании. Критерии исключения – болезнь студента в период обследования.

Эксперимент включал в себя 5 этапов исследования. На первом этапе у испытуемых регистрировались параметры НМС в спокойном состоянии (при отсутствии активного акустического воздействия). На втором этапе испытуемому было предложено прослушать запись «белого» шума с одновременной регистрацией параметров НМС. На третьем этапе к прослушиванию предлагалась ритмичная музыка, на четвертом – классическая музыка, на пятом – агрессивная музыка (hard rock). Между каждым этапом испытуемым предоставлялось время на восстановление от 15 мин. Также необходимо отметить, что акустическое воздействие осуществлялось на среднем уровне громкости, при котором студенты не испытывали дискомфорта, связанного с высокой интенсивностью звукового потока.

Использование датчиков токовихревого типа в биофизическом измерительном комплексе (БИК), разработанном в лаборатории биокибернетики и биофизики сложных систем при СурГУ, обеспечивает высокую точность измерений и широкий диапазон частот регистрируемого тремора, а также обработку полученной информации. Принцип работы БИК заключается в использовании сигналов от двух токовихревых датчиков, между которыми помещается исследуемый объект для измерения его микроперемещений. Обработку сигналов с датчиков производили с использованием запатентованной программы (№ 2000610599 от 2000 г.), обеспечивающей получение спектральных характеристик и их анализ в фазовом пространстве состояний.

Расчет параметров КА производился по программам для ЭВМ (свидетельства № 2006613212 и 2010108496). По полученным кинематограммам были построены фазовые портреты микродвижений в координатах x_1 (удаление пальца от датчика) и $x_2 = dx/dt$ (скорость перемещения пальца) (рис. 1). Проведенный сравнительный анализ поведения динамической системы управления движениями в режиме покоя и акустического воздействия на фазовой плоскости методом многомерных фазовых пространств представлен на рис. 1–4 (в данном случае размерность фазового пространства была равна двум), т. е. $x = (x_1, x_2)^T$.

Качественно изменение хаотической динамики можно увидеть на изменении геометрии и конфигурации квазиаттракторов, количественные характеристики квазиаттракторов (значения площадей КА) представлены ниже.

Значение объема КА без акустического воздействия составляет $1{,}22 \cdot 10^{-6}$ у. е. Во время прослушивания музыки различных направлений наблюдается следующая динамика объемов КА: при прослушивании «белого шума» объем КА увеличивается до $2{,}45 \cdot 10^{6}$ у. е., т. е. объем увеличился в 2 раза, что характеризует изменение состояния системы в сторону большей степени вариабельности. У всех испытуемых во время прослушивания записи «белого шума» наблюдается выраженная реакция на акустическое воздействие со стороны НМС. Следует отметить, что предлагаемый метод фазовых пространств на основе определения объемов квазиаттракторов позволяет дать оценку степени влияния шумовой нагрузки на организм человека.

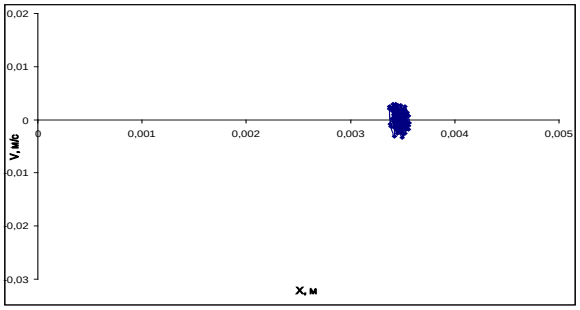


Рис. 1. Фазовый портрет треморограмм испытуемого СКС с координатами x_1, $x_2 = dx_1/dt$, для вектора НМС $x = (x_1, x_2)$: испытуемый под воздействием хард-рока

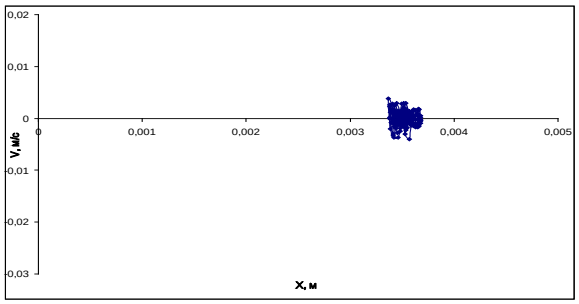


Рис. 2. Фазовый портрет треморограмм испытуемого СКС с координатами x_1, $x_2 = dx_1/dt$ для вектора НМС $x = (x_1, x_2)$: испытуемый под воздействием «белого шума»

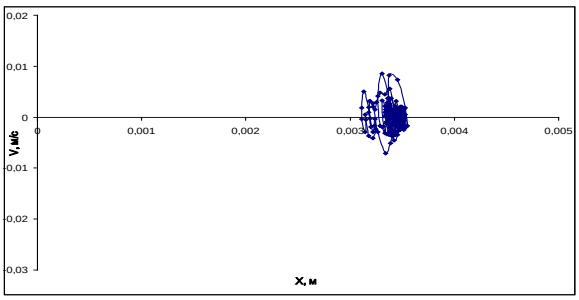


Рис. 3. Фазовый портрет треморограмм испытуемого СКС с координатами x_1, $x_2 = dx_1/dt$ для вектора НМС $x = (x_1, x_2)$: испытуемый под воздействием ритмической музыки

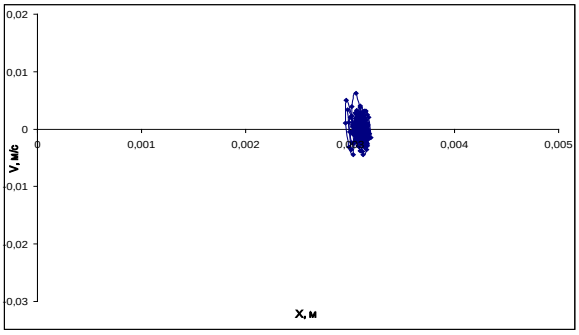


Рис. 4. Фазовый портрет треморограмм испытуемого СКС с координатами x_1, $x_2 = dx_1/dt$ для вектора НМС $x = (x_1, x_2)$; испытуемый под воздействием классической музыки. Здесь: по оси y – координата скорости в миллисекундах (мс); по оси x – координата x в метрах (м)

При прослушивании ритмической музыки продолжает происходить увеличение объема КА до $6{,}83 \cdot 10^6$ у. е., т. е. ритмическая музыка расширяет объем КА по сравнению с объемом без акустического воздействия в 5,5 раза от исходного состояния. Противоположное воздействие оказывает классическая музыка, которая стабилизирует объем КА, что отражается в его снижении до $2{,}62 \cdot 10^6$ у. е. Прослушивание классической музыки вызывало у испытуемых разнонаправленную реакцию, у части, примерно у 43 % испытуемых, площадь КА увеличилась в сравнении со спокойным состоянием, у 48 % испытуемых площадь КА уменьшилась, у остальных (9 %) площадь КА практически не изменилась. При прослушивании ритмичной музыки реакция НМС подобна реакции на «белый шум» или агрессивную музыку: наблюдается значительное сокращение площади КА. Подобная реакция у испытуемых предсказуема, и объяснить это можно тем, что при прослушивании ритмичной музыки ритм, заложенный в музыкальную композицию, навязывается самой функциональной системе организма (ФСО). При проведении эксперимента использовался комфортный уровень звука для испытуемого, не вызывающий дискомфорта, и даже в таком варианте мы видим значительное изменение в ФСО. Если же уровень воздействия увеличить, то мы получим значительное упорядочивание в работе ФСО, в частности НМС, в соответствии с современными представлениями и теорией хаоса-самоорганизации. Любая строгая упорядоченность в работе ФСО свидетельствует о нарастании стрессовой реакции. Известно, что на музыкальных концертах люди часто испытывают дискомфорт и ухудшение состояния организма. Наиболее часто слушатели концертов обращаются с симптомами повышенного артериального давления, аритмией и т. д.

Любое направленное акустическое воздействие изменяет значения параметров тремора. Это проявляется в изменении площадей квазиаттракторов треморограмм. При воздействии «белого-шума» или агрессивной музыки реакция НМС у части испытуемых напоминает реакцию на физические нагрузки, что говорит о значительном стрессе испытуемых. Показано, что при наличии выраженного ритма в акустическом сигнале происходит его навязывание в работе НМС человека.

Литература

1. *Еськов В.М., Гавриленко Т.В., Дегтярев Д.А. и др.* Динамика квазиаттракторов параметров непроизвольных микродвижений конечностей человека как реакция на локальные термические воздействия // Вестник новых медицинских технологий. 2012. Т. 19, № 4. С. 26–29.

2. *Леер Е.И., Зверева С.В.* Особенности влияния музыки разных направлений на физиологические характеристики активности сердца юношей и девушек 14–16 лет // Молодой ученый. 2013. №1. С. 310–318.

3. *Новицкая Л.П.* Влияние различных музыкальных жанров на психическое состояние человека // Психологический журнал. 1984. Т. 5, № 6. С. 79–86.

4. *Полякова В.Б.* К вопросу о влиянии музыки на мышечную и сердечную деятельность человека // Экспериментальные исследования по физиологии, биофизике и фармакологии. 1967. № 7. С. 111–114.

5. *Гавриленко Т.В., Балтикова А.А., Дегтярев Д.А. и др.* Хаотическая динамика непроизвольных движений конечности человека в 4-мерном фазовом пространстве // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2012. № 1. С. 86–94.

Последовательная активность в нейронном ансамбле с возбуждающими связями

А.Г. Коротков, Г.В. Осипов

[1] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
grosipov@gmail.com

Введение

Многие динамические процессы в нейронных ансамблях представляют собой последовательные переключения активности между отдельными элементами и (или) группами элементов. Такая последовательная нейронная активность может быть связана со многими физиологическими функциями нервной системы. Генерация и распространение последовательностей возбуждения между отдельными элементами, а также между группами нейронов играют важнейшую роль в функционировании мозга и нервной системы в целом. Например, известно, что подобный тип активности является неотъемлемым свойством нейронных сетей в сенсорных и двигательных системах животных [1]. Также определенный отдел мозга птиц генерирует последовательности пачечной активности, которые, в свою очередь, управляют голосовым аппаратом и обеспечивают воспроизведение песни [2]. Существует еще множество примеров, где ключевую роль играют последовательности возбуждения в нейронных сетях.

Чрезвычайно актуально рассмотреть последовательную активность в нейронных сетях с точки зрения нелинейной динамики. Существует гипотеза [1], что причиной последовательной активности в нейронных сетях может быть образование устойчивого гетероклинического контура в фазовом пространстве динамической системы, моделирующей активность нейронной сети [3, 4, 5, 6]. В основе генерации последовательных переключений активности лежит winnerless competition (далее WLC), что можно перевести как «принцип беспобедительной конкуренции» [7]. Суть этого принципа как раз и заключается в существовании в фазовом пространстве устойчивого гетероклинического контура между особыми траекториями седлового типа (седловыми состояниями равновесия, седловыми предельными циклами и т. д.) [8, 9]. Прохождение изображающей точки в окрестности определенной седловой траектории означает активацию определенного нейрона или группы нейронов. Таким образом, устойчивый гетероклинический контур в фазовом пространстве является математическим образом последовательных переключений активности в ансамблях связанных нейронов. Необходимым условием существования такого поведения является наличие ингибиторных связей между нейронами.

В нашей работе мы исследовали вопрос о переключательной активности в ансамбле возбуждающе связанных элементов.

Модель ансамбля

Рассмотрим сеть из N элементов типа Лотки – Вольтерры с возбуждающими связями. Каждый элемент задается уравнениями:

$$\dot{\rho}_j = (I_j + J_j)\rho_j(-1 + I_j - \rho_j^2),$$

где:

ρ_j – мощность j-й популяции;

$I_j = \sum_{i=1}^{N} g_{ij} F(\rho_i)$ – входное воздействие на j-й элемент;

g_{ij} – элементы матрицы коэффициентов связей;

$J_j = \sum_{i=1}^{N} g_{ji} F(\rho_i)$ – дополнительный параметр, который равен 1 тогда и только тогда, когда активен элемент, который будет активироваться после j-го элемента;

$F(\rho) = \begin{cases} 1, \text{если } \rho \geq 0{,}999 \\ 0, \text{если } \rho < 0{,}999 \end{cases}$ – функция Хевисайда с порогом q = 0,999. Условимся считать элемент i активным, если $F(\rho_i) = 1$.

Модель с асимметричными связями

Сначала мы исследовали сеть из трех элементов со следующей матрицей коэффициентов связей:

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Эта матрица описывает асимметричные связи и задает порядок активирования элементов 1-2-3.

При выбранных коэффициентах связей система примет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\rho}_1 = (F(\rho_2) + F(\rho_3))\rho_1(-1 + 2F(\rho_3) - \rho_1^2), \\ \dot{\rho}_2 = (F(\rho_3) + F(\rho_1))\rho_2(-1 + 2F(\rho_1) - \rho_2^2), \\ \dot{\rho}_3 = (F(\rho_1) + F(\rho_2))\rho_3(-1 + 2F(\rho_2) - \rho_3^2). \end{cases}$$

В фазовом пространстве этой системы существует устойчивый гетероклинический цикл.

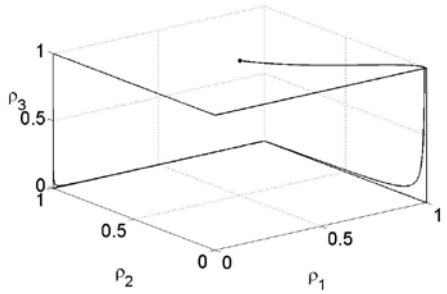


Рис. 1. Фазовый портрет системы при начальных условиях (0,5; 0,5; 1). Изображающая точка движется поочередно в плоскостях $\rho_i = C$, $q \le C \le 1$, причем $C \to q$ при $t \to +\infty$ (если взять начальные условия вида (a, b, q), то фазовая траектория будет лежать на гранях куба, длина ребра которого равна q и 3 его грани расположены в плоскостях $\rho_1 = 0$, $\rho_2 = 0$, $\rho_3 = 0$). На его гранях в точках с нулевыми координатами располагаются седловые состояния равновесия с сепаратрисами, направленными по координатным осям. Траектория изображающей точки стремится к этим сепаратрисам.

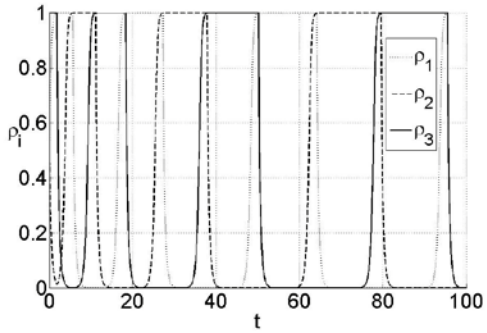


Рис. 2. Осциллограмма колебаний элементов системы с асимметричными связями. Время активности каждого элемента увеличивается при каждой последующей активации.

Модель с симметричными связями

Далее мы рассмотрели систему с симметричными возбуждающими связями. Ее матрица коэффициентов связей имеет вид

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 2 & \varepsilon \\ \varepsilon & 0 & 2 \\ 2 & \varepsilon & 0 \end{pmatrix}.$$

Система примет вид

$$\begin{cases} \dot{\rho}_1 = (F(\rho_2) + F(\rho_3))\rho_1(-1 + \varepsilon F(\rho_2) + 2F(\rho_3) - \rho_1^2), \\ \dot{\rho}_2 = (F(\rho_3) + F(\rho_1))\rho_2(-1 + \varepsilon F(\rho_3) + 2F(\rho_1) - \rho_2^2), \\ \dot{\rho}_3 = (F(\rho_1) + F(\rho_2))\rho_3(-1 + \varepsilon F(\rho_1) + 2F(\rho_2) - \rho_3^2). \end{cases}$$

В фазовом пространстве этой системы существует устойчивый предельный цикл.

Для доказательства этого было построено точечное отображение. Начальной точкой взята точка (q, a, q) на ребре куба. Конечная точка – это точка с координатами (q, q, b).

Функция имеет следующий вид:

$$b = \sqrt{\frac{q^2(\varepsilon - 1)}{q^2 - \left|q^2 - \varepsilon + 1\right|\left(\frac{a^2(1-q^2)}{q^2(1-a^2)}\right)^{\varepsilon - 1}}}.$$

На рисунке 3 представлены графики этой функции при различных ε.

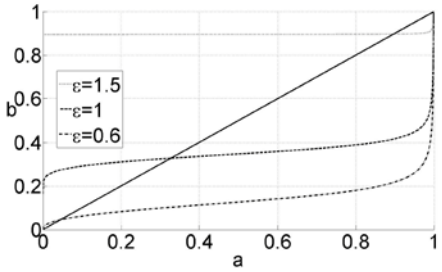


Рис. 3. Графики функции $b(a)$ пересекают прямую $a = b$. На рисунке видно, что точкам пересечения соответствует устойчивый предельный цикл.

Далее мы рассчитали время активности элемента (оно равно времени движения фазовой точки по грани куба). Оно задается рекуррентными соотношениями

$$\Delta t_{i+1} = \ln \frac{q\sqrt{1 - a_i^2}}{a_i\sqrt{1 - q^2}},$$

$$a_{i+1} = \sqrt{\frac{q^2(\varepsilon - 1)}{q^2 - \left|q^2 - \varepsilon + 1\right|\left(\frac{a_i^2(1-q^2)}{q^2(1-a_i^2)}\right)^{\varepsilon - 1}}}.$$

На рисунке 4 представлены графики зависимости времени активности от порядкового номера активации.

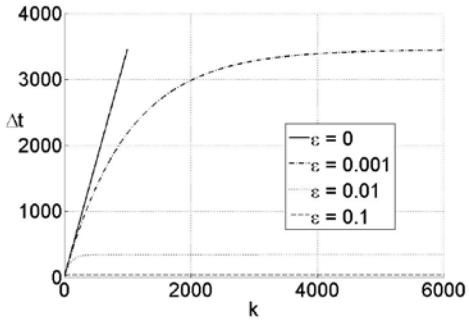


Рис. 4. Время активности элементов

Полученные результаты позволяют утверждать, что в фазовом пространстве системы с симметричными связями присутствует устойчивый предельный цикл. Полученная с помощью численного расчета осциллограмма колебаний подтверждает это (рис. 5).

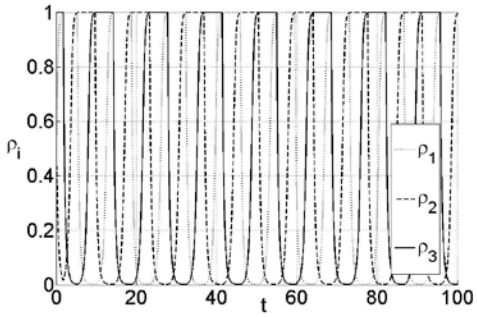


Рис. 5. Осциллограмма колебаний элементов системы с симметричными связями. Время активности каждого элемента остается постоянным.

Литература

1. *Rabinovich M.I., Varona P., Selverston A.I., Abarbanel H.D.I.* Dynamical principles in neuroscience // Review of modern physics. 2006. V. 78. P. 1213–1265.

2. *Hahnloser R.H.R., Kozhevnikov A.A., Fee M.S.*. An ultra-sparse code underlies the generation of neural sequences in a songbird // Nature. 2002. V. 419. P. 65–70.

3. *Guckenheimer J., Holmes P.* Structurally stable heteroclinic cycles // Math. Proc. Cambridge Philos. Soc. 1988. V. 103. P. 189–192.

4. *Stone E., Holmes P.* Random perturbations of heteroclinic attractors // SIAM Journal on Applied Mathematics. 1990. V. 50. P. 726–743.

5. *Postlethwaite C.M., Dawes J.H.P.* Resonance bifurcations from robust homoclinic cycles // Nonlinearity. 2010. V. 23. P. 621–642.

6. *Driesse R., Homburg A.J.* Resonance bifurcation from homoclinic cycles // Differential Equations. 2009. V. 246. P. 2681–2705.

7. *Seliger P., Tsimring L.S., Rabinovich M.I.* Dynamical coding of sequential spatial memory: winnerless competition of patterns // Physical Review E. 2003. V. 67. P. 011905.

8. *Afraimovich V.S., Rabinovich M.I., Varona P.* Heteroclinic contours in neural ensembles and the winnerless competition principle // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2004. V. 14. P. 1195–1208.

9. *Afraimovich V.S., Zhigulin V.P., Rabinovich M.I.* On the origin of reproducible sequential activity in neural circuits // Chaos. 2004. V. 14. P. 1123–1129.

Механизмы взаимной адаптации человека и сложных технических систем

А.Э. Кречмер, М.В. Никитин

ЗАО ЕИ, Вологда
kak@vcom.ru

Стремительное развитие отрасли информационно-коммуникационных технологий породило достаточно сложную проблему взаимодействия человека с большим числом различных технических устройств и систем. Особенно остро данная проблема проявляется в так называемых эргатических системах – системах управления сложными техническими комплексами, составным элементом которых является человек-оператор или группа операторов (например, система управления самолетом, диспетчерская служба вокзала, аэропорта и т. п.).

На протяжении всей эволюции эргатических систем их развитие шло в направлении наращивания и усложнения функционала входящих в их состав технических компонентов. На первом этапе развития эргатических систем основным способом их оптимизации было приспособление человека к техническим устройствам. На следующем этапе оптимизация шла уже за счет приспособления технических устройств к человеку, с учетом его психологических, физиологических, антропометрических и других характеристик. В настоящее время протекает третий этап развития эргатических систем с учетом такого понятия, как человеческий фактор: человек при этом рассматривается как часть технической системы с учетом всех его ограничений и возможностей принятия ошибочных или алогичных решений в конкретных ситуациях. Техническая часть системы рассматривается как средство, включенное в деятельность человека-оператора.

Существует ряд проблем, требующих решения в процессе создания и эксплуатации эргатических систем:

1. Учет и компенсация влияния человеческого фактора на работу системы. В первую очередь, это касается установки ограничений на действия (преднамеренные или непреднамеренные) либо бездействия оператора, которые могут повлечь за собой негативные последствия для процесса функционирования системы.
2. Определение границ и возможностей человека-оператора, а также учет психологических аспектов деятельности человека в процессе взаимодействия с техническими системами и при принятии решений.
3. Создание максимально комфортных условий для взаимодействия человека и техники, использование всех возможностей современных технологий для уменьшения потребности адаптации людей к системе.

Именно решение последней проблемы видится ключевым фактором для преодоления разрыва между растущими возможностями технических устройств и ограниченными возможностями человека по восприятию и обработке информации.

Для решения данной проблемы предлагается ввести понятие взаимной адаптации технических устройств и человека-оператора. Взаимная адаптация может быть реализована за счет использования в эргатических системах специальных устройств (или интерфейсов) – гетероадаптеров.

Адаптивные интерфейсы

Проблемой построения эффективных человеко-машинных интерфейсов современная наука занимается достаточно давно. Наибольшую актуальность данная проблема приобрела во второй половине XX века – в эпоху стремительного развития информационных технологий. Начиная с середины 90-х годов, когда персональные компьютеры окончательно определили основной вектор развития дальнейшего взаимодействия человека и технических систем через устройства ввода-вывода, такие как клавиатура, мышь и монитор, одним из основных направлений исследований стало человеко-компьютерное взаимодействие. Главной целью данных исследований является создание качественного пользовательского интерфейса, позволяющего значительно облегчить взаимодействия человека с компьютерными системами.

Основной проблемой, с которой сталкиваются разработчики пользовательских компьютерных интерфейсов, является различие между когнитивной моделью восприятия окружающего мира человеком и информационными моделями, применяемыми при разработке программно-аппаратных комплексов. Необходимость повышения качества человеко-машинного взаимодействия и решение связанных с этим проблем потребовало от исследователей применения новых подходов к проектированию и реализации интерфейсов.

В последнее время достаточно активно развивается технология динамических адаптивных пользовательских интерфейсов. Это связано с тем, что пользователи, недостаточно хорошо ориентирующиеся в вычислительных системах, нуждаются в интерфейсе, который бы учитывал отсутствие опыта, а также индивидуальные способности каждого человека. Потребность в создании адаптивных человеко-машинных систем обусловлена, во-первых, различиями, которые неизбежно присущи работающим с техническими системами людям, а во-вторых, неоднородностью свойств конкретных технических систем и решаемым с их помощью задачами.

В методологии проектирования адаптивных интерфейсов большое значение придается разработке систем, которые могут динамично изменяться, подстраиваясь под конкретного пользователя, при этом учитывая аппаратные и программные характеристики конкретной технической системы. Предполагается, что пользователю удобнее взаимодействовать с технической системой как с равноправным партнером, обмениваясь информацией в режиме интерактивного диалога, а не слепо следовать инструкциям и предписаниям. Так как в последнее время проявляется тенденция ко все большему применению адаптивных интерфейсов для создания сложных технических систем, разработка гетероадаптера может стать достаточно эффективным решением проблемы взаимной адаптации человека и технических устройств.

Гетероадаптер как «симулятор» живой системы

Проблема разработки аналогов живых организмов с перспективой создания полной искусственной «копии» тела человека – одна из наиболее обсуждаемых футуристических задач нового тысячелетия. Очевидно, что с научной точки зрения проблема очень сложна и требует длительной целенаправленной разработки. Однако, несмотря на кажущуюся на сегодняшний день «фантастичность» данной идеи, развитие современных технологий показывает, что имитация деятельности живого организма – вполне решаемая задача.

Одна из основных проблем при создании технических систем подобного рода – это проблема формализации процессов, происходящих в живых системах, т. е. перевод их в формат, который может быть использован непосредственно в техническом устройстве. На сегодняшний день все попытки алгоритмизации и формализации так называемых когнитивных процессов пока не позволяют создавать технические системы, которые могут симулировать деятельность даже простейшего биологического объекта. Основная проблема здесь видится в недостаточном понимании основных принципов функционирования живых систем.

Все существующие системы распознавания построены на классификаторах объектов, поэтому результат «распознавания» зависит напрямую от точности и детальности используемого классификатора. Разрабатываемые системы классификации не соответствуют требованиям, предъявляемым к живым системам, поскольку не позволяют адаптироваться к меняющимся условиям внешней среды. Формирование адаптационных систем распознавания является одним из требований для создания полноценного симулятора живого организма.

Еще одной особенностью живых организмов является отсутствие выделенных блоков, таких как память или ЦПУ. В частности, в живых объектах память распределена по всей структуре организма с участием как нервных, так и соматических элементов, а также отсутствует выделенный центр управления (мозг и нервная система, по сути, играют роль сложного коммутатора).

Кроме того, в живых системах нет выраженного управления своими действиями, а есть динамическое регулирование собственной границы в ответ на воздействие внешней среды. В данном случае под границей понимается совокупность сенсоров и эффекторов, с помощью которых поддерживается гомеостаз живой системы в текущих условиях. Грубо говоря, возможность регулирования собственной границы является основной особенностью, отличающей живую систему от неживой. Другим отличительным признаком живой системы является возможность «запоминать» конфигурации границы, вызванные воздействиями внешней среды. Именно запомненные конфигурации позволяют живому объекту предсказывать последующие события в зависимости от текущих условий, т. е. прогнозировать будущее.

Разрабатывая симулятор живой системы, также необходимо учитывать следующий факт: в живых системах взаимодействие с окружающей средой построено на единственной базовой операции – операции сравнения. Если сигнал, приходящий на сенсоры, не находит совпадения в «памяти» организма, то он вызывает последовательную активацию множества эффекторов с попыткой распознать сигнал, т. е. найти ближайший аналог из запомненных ранее (организм тестирует внешнюю среду, пытаясь выработать необходимую для выживания конфигурацию собственной структуры). Сформированная подобным образом конфигурация запоминается и используется в дальнейшем при возникновении аналогичных ситуаций.

Построенный на данных принципах симулятор живой системы будет обладать следующими базовыми признаками: возможностью приспосабливаться к изменяющимся условиям внешней среды и способностью адекватно реагировать на происходящие изменения. Подобный симулятор может использоваться для взаимной адаптации человека и технических устройств в эргатических системах – играть роль гетероадаптера.

Основные характеристики гетероадаптера

Основная цель гетероадаптера – заменить иерархическое управление системой, когда человек-оператор обменивается данными через различные системы ввода-вывода данных, на адаптационное управление, когда система и человек координируют совместную деятельность в зависимости от внешних условий. При этом задается граница взаимодействия, за пределы которой взаимное влияние выходить не может. В рамках предлагаемой концепции гетероадаптер является динамическим симулятором живой системы, позволяющей значительно расширить рецептивное поле человека за счет формализации обмена данными между человеком и техническими устройствами.

Гетероадаптер представляет собой техническое устройство (контроллер), которое обладает рядом специфических свойств, позволяющих ему

реагировать на внешние воздействия и в зависимости от реакции менять собственную конфигурацию. Данные свойства придают устройству сходство с биологическими системами, основным отличием которых является способность приспосабливаться к окружающей среде при постоянно меняющихся условиях. В свою очередь, это позволяет использовать гетероадаптер в качестве универсального интерфейса между человеком и машиной, позволяющего им обмениваться информацией и влиять друг на друга в режиме взаимной адаптации.

Реализация данной технологии позволит на порядок повысить уровень интеграции между человеком и машиной и частично решить большинство основных проблем эргатических систем, в первую очередь снизив влияние человеческого фактора.

В последние годы произошли значительные изменения в технологиях обмена данными между человеком и техническими устройствами. В дополнение к стандартным устройствам ввода, таким как клавиатуры и манипуляторы, активно развиваются сенсорные технологии, а также разрабатываются и внедряются новые виды интерфейсов, основанные на распознавании действий оператора: управление голосом, жестами, мимикой. Не вызывает сомнения тот факт, что уже в ближайшее время будут доступны технологии, позволяющие считывать практически любую информацию с тела человека.

Для реализации адаптационного интерфейса необходимо сформулировать четкое представление о структуре гетероадаптера и системе его организации. Объем необходимых работ достаточно большой, однако уже существующие разработки, возможности современных технологий и очень широкие перспективы использования подобных устройств позволяют предполагать востребованность данных исследований уже в ближайшем будущем.

Предпосылки возможности создания гетероадаптера

1. Развитие сенсорных технологий позволит создавать датчики с различными диапазонами (модальностями) воспринимаемых сигналов, с необходимо высокой чувствительностью.

2. Уменьшение размеров и удешевление технологий производства сенсоров позволит на относительно небольшой площади размещать значительное число различных датчиков.

3. Снижение стоимости разработок и удешевление компонентов позволит создать контроллер относительно невысокой конечной стоимости и сделать устройство массовым.

Требования к системе организации гетероадаптера

1. Способность навигации и позиционирования контроллера по двум и более модальностям.

2. Количество сенсоров должно соответствовать достижению требуемой точности к навигации и позиционированию контроллера.

3. Способность изменять конфигурацию сенсоров как за счет перемещения их в пространстве (приближение, отдаление от источника регистрируемого сигнала), так и за счет изменения уровня чувствительности сенсоров.

4. Контроллер должен иметь возможность моделировать собственную границу и отражать ее изменения в виде проекции в памяти (формировать карту своих движений).

5. Должен быть реализован механизм безусловных ограничений, срабатывающих при приближении к определенным пороговым значениям. Данный механизм должен предотвращать действия среды и контроллера, которые могут привести к негативным последствиям как для контроллера, так и для среды.

6. Должен быть реализован механизм ранжирования стандартных конфигураций в изменяющихся условиях.

7. Должны поддерживаться протоколы проводной и беспроводной связи.

Пояснения к требованиям

Кожа человека обладает различными физическими параметрами, которые могут различаться в зависимости от локализации участка, физиологического состояния организма, индивидуальных особенностей. Для стандартизации потока регистрируемых с поверхности кожи данных контроллер необходимо наделить способностью изменять собственную конфигурацию границы в зависимости от изменений параметров внешней среды (важнейшим компонентом внешней среды в данном случае будет поверхность кожи человека).

Решение данной задачи потребует большого количества датчиков, которые смогли бы выявлять изменения тех параметров, которые дают возможность отражать положение контроллера. Если провести аналогию с биологическими организмами, сенсорные системы которых решают аналогичные задачи, то количество датчиков может колебаться от нескольких сот до нескольких десятков тысяч.

Возможны два варианта изменений и отслеживания позиционирования контроллера:

а) с помощь микроприводов изменять положение группы датчиков либо всего контроллера целиком, подстраиваясь под внешнюю среду;

б) за счет увеличения или снижения чувствительности выбранных групп датчиков формировать наиболее оптимальную конфигурацию для снятия данных с поверхности кожи.

С помощью полученных данных контроллер должен формировать карту изменений своей границы, выделяя участки траекторий этих изменений для каталога шаблонов. Эти шаблоны будут использоваться для отражения проекции границы контроллера в различных ситуациях для формирования регулирующего сигнала.

По параметрам получаемых от датчиков данных, а также по шаблонам и их конфигурациям создается классификатор предельных условий и ограничений для предотвращения опасных ситуаций как для человека, так и для контроллера и подключенных управляемых устройств. Для разрешения конфликтных ситуаций между регулирующими сигналами контроллер формирует динамическое ранжирование, исходя из ситуационных коэффициентов.

Размещение контроллера предполагается на предплечье (шириной примерно 20 см от локтевого сустава) и/или на шее.

Литература

1. *Александров Ю.И.* Введение в системную психофизиологию // Психология XXI века. М. : Пер Се, 2003. С. 39–85.

2. Физиология поведения : нейробиологические закономерности / под ред. А.С. Битуева. Л. : Наука, 1987. 736 с.

3. *Зевеке А.В.* Механизм формирования кодов при осязании. Нижний Новгород : Нижегородская государственная медицинская академия ; ЦНИЛ. 5 с.

4. *Николлс Д., Мартин Р., Валлас Б., Фукс П.* От нейрона к мозгу / пер. с англ. П.М. Балабана, А.В. Галкина, Р.А. Гинниатулина, Р.Н. Хазипова, Л.С. Хируга. М. : Едиториал УРСС, 2003. 672 с.

5. *Сергеев С.Ф.* Введение в инженерную психологию и эргономику эммерсивных сред : учебное пособие. СПб. : Изд-во СПбГУ ИТМО, 2011. 258 с.

6. *Вайсер М., Шнейдерман Б., Уиллиджис Р.С. и др.* Человеческий фактор. Эргономика в автоматизированных системах. Т. 6 / под ред. Г. Салвенди. М. : Мир, 1992.

7. *Яхно В.Г.* Основные динамические режимы осознания сенсорных сигналов в нейроноподобных моделях. Проблемы на пути к «нейроморфному» интеллекту [Электронный ресурс].

Методы нелинейной динамики для оценки динамики вегетативных показателей и нейронной активности

А.К. Крылов

Институт психологии РАН, Москва
neuru@mail.ru

Ритм сердца и нейронная активность могут рассматриваться как точеный случайный процесс и анализироваться сходными математическими методами нелинейной динамики. Анализ может проводиться на различных масштабах времени.

На большом масштабе времени (десятки минут) могут использоваться показатели фрактальной размерности последовательности межпульсовых или межспайковых интервалов [1–3].

На меньших интервалах времени (секунды) могут выявляться фазы изменения частоты импульсации нейрона или изменения пульса. На сопоставлении фаз повышенной частоты импульсации нейронов с поведением основан метод выявления поведенческой специализации нейронов [4, 5]. Показано, что нейроны достоверно повышают частоту импульсации в определенные поведенческие акты [4, 5], длящиеся, например, порядка секунды.

В настоящей работе мы предлагаем метод анализа нейронной активности, использованный нами ранее для анализа пульса [6–14]. Этот метод может использоваться для анализа особенностей нейронной активности в рамках одного поведенческого акта (в масштабе долей секунды), а затем может быть оценена статистика соответствующих показателей на масштабе всей записи данных (десятки минут).

Метод основан на предложенном С.Л. Загускиным [8, 9] дроблении пульса на фазы преобладания симпатического или парасимпатического тонусов. Фаза преобладания симпатического тонуса характеризуется учащением пульса и детектируется как последовательное уменьшение межпульсовых интервалов (первая фаза на рис. 1). Фаза преобладания парасимпатического тонуса характеризуется уменьшением пульса и детектируется как последовательное увеличение межпульсовых интервалов (вторая фаза на рис. 1). Мы предлагаем 10-символьный способ кодирования межпульсовых и межспайковых интервалов: символом *S* запишем фазу преобладания симпатического тонуса (сокращение интервалов), символом *P* запишем фазу преобладания парасимпатического тонуса (увеличение интервалов) и цифрой запишем количество интервалов в фазе – от 1 до 5 (рис. 1). Если в одной фазе оказывается более 5 последовательных интервалов, то оставляем в кодировке цифру 5, так как такие случаи крайне редки. Получается алфавит из 10 символов: {*S*1, *S*2, *S*3, *S*4, *S*5, *P*1, *P*2, *P*3, *P*4, *P*5}. Дополнительно, для сравнения, рассмотрим вариант кодирования 5 символами, при котором не делается различий между *S* и *P*: {1, 2, 3, 4, 5}.

Вся запись активности нейрона или пульса таким методом кодирования будет преобразована в последовательность символов из 10- или 5-символьного алфавита. Например, последовательность из 8 спайков на рис. 1 будет преобразована в слово из двух символов: *S*4*P*3.

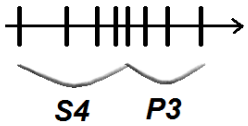


Рис. 1. Пример кодировки пульса или нейронной активности. По горизонтальной оси – время. Вертикальные палочки – моменты спайков или удары пульса. Межпульсовые или межспайковые интервалы соответствуют промежуткам между палочками. Показано учащение активности, выражающееся в последовательном уменьшение 4 интервалов и закодированное символом *S*4; затем разрежение активности, выражающееся в последовательном увеличении 3 интервалов и закодированное символом *P*3.

Разные символы отражают разную степень выраженности симпатического и парасимпатического тонуса. Выраженность симпатического тонуса нарастает от *S*1 к *S*5, а парасимпатического от *P*1 к *P*5. Поэтому некоторую информацию можно получить из статистики символов в записи. Для оценки изменений вегетативного статуса при решении когнитивных задач мы оценивали частоты появления различных символов до нагрузки, в покое (контроль) и во время нагрузки (при решении задачи) (рис. 2) [12]. Для выявления индивидуальных различий в вегетативном статусе при решении когнитивной задачи можно сопоставить частоты появления символов при решении задачи у разных испытуемых.

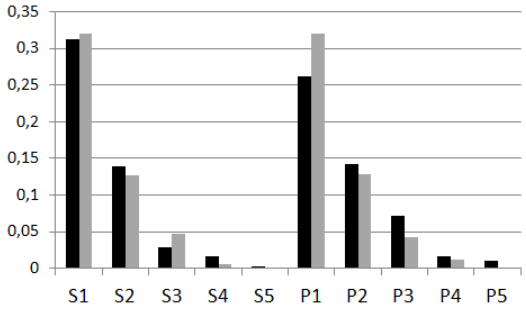


Рис. 2. Пример частот «символов», возникающих в пульсе во время отдыха (черные столбцы) и при решении когнитивной задачи (серые столбцы) (исп. Б.А.)

Следующая оценка может быть получена путем оценки разнообразия слов определенной длины, встречающихся в записи. Ввиду особенности метода кодирования фазы *S* и *P* чередуются, поэтому максимальный объем словаря для слов длины *N* из 10-символьного алфавита равен 2·5/*N*. Однако далеко не все комбинации символов встречаются в записях (рис. 3) [6–8].

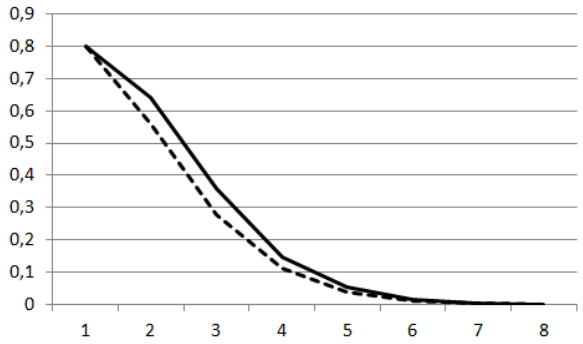


Рис. 3. Объем словаря как доля обнаруженных последовательностей символов (*N*-грамм) среди возможных последовательностей данной длины (2·5/*N*). По горизонтали – длина последовательности (*N*-граммы). Сплошная линия – при 5-символьном кодировании, объединяющем *S* и *P*; пунктирная линия – при 10-символьном кодировании, различающем *S* и *P* (исп. Б.А.)

Для оценки разнообразия и взаимозависимостей в последовательности межпульсовых и межспайковых интервалов может использоваться оценка условной энтропии последовательности символов определенной длины [6, 7] (рис. 4).

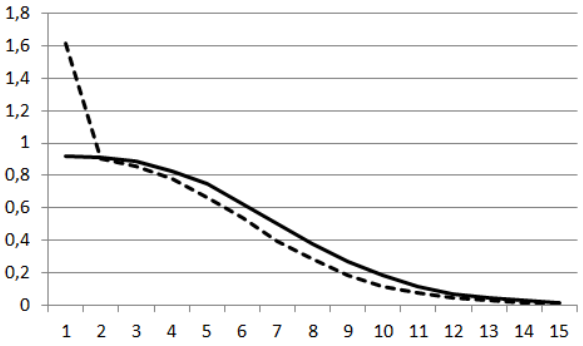


Рис. 4. Условная энтропия возникновения символов в позиции *N* после (*N* – 1)-граммы. По горизонтали – длина последовательности (*N*). Сплошная линия – при 5-символьном кодировании, объединяющем *S* и *P*; пунктирная линия – при 10-символьном кодировании, различающем *S* и *P* (исп. Б.А.)

Эти показатели – статистика символов, объем словаря для слов длины *N*, условная энтропия для слов длины *N* – могут использоваться для оценки различий в вегетативной готовности решать когнитивную задачу и степени эмоциональной вовлеченности в ее решение при оценке пульса у людей (рис. 5, 6) [12] и для анализа нейронной активности при решении задач животными.

Математическое единство метода, примененного к анализу нейронной активности и вегетативного статуса, дает возможность сопоставить результаты экспериментов для процессов таких разных уровней. Методы нелинейной динамики с переходом к анализу символьной динамики позволяют рассмотреть изучаемый процесс в его динамике на разных масштабах времени.

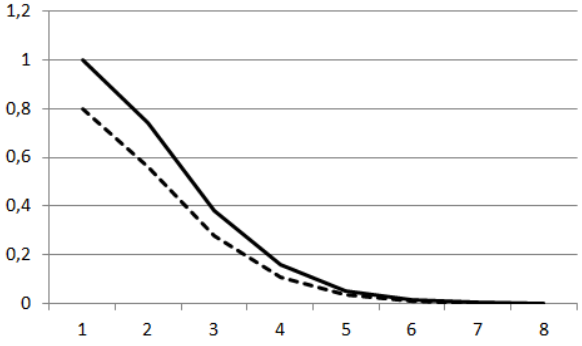


Рис. 5. Сопоставление объемов словарей двух испытуемых (сплошная линия – исп. Т.А., пунктир – исп. Б.А.). Обозначения как на рис. 3

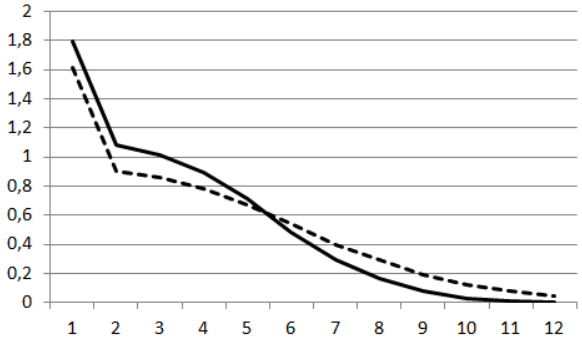


Рис. 6. Сопоставление условных энтропий последовательностей у двух испытуемых (сплошная линия – исп. Т.А., пунктир – исп. Б.А.). Обозначения как на рис. 4

Исследование выполнено при поддержке гранта РГНФ № 11-06-00482а и гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ НШ-3010.2012.6.

Литература

1. *Teich M.C. et al.* Fractal Character of the Neural Spike Train in the Visual System of the Cat // J. Opt. Soc. Am. A. 1997. V. 14. P. 529–546.

2. *Крылов А.К.* Нелинейные и фрактальные свойства нейронной активности – следствия для моделирования // Материалы XV Международной конференции по нейрокибернетике. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2009. Т. 1. С. 105–108.

3. *Крылов А.К.* Фрактальный анализ активности нейронов и поведения модели / Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 109–116.

4. *Швырков В.Б.* Введение в объективную психологию : нейрональные основы психики / под ред. Ю.И. Александрова. М. : Изд-во «Институт психологии РАН», 1995.

5. *Александров Ю.И.* Теория функциональных систем и системная психофизиология // Системные аспекты психической деятельности / под ред. К.В. Судакова. М. : Эдиториал УРСС, 1999. С. 96–152.

6. *Гуров Ю.В.* Символическая динамика в приложении к исследованию ритма сердца // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. № 4. С. 54–67.

7. *Гуров Ю.В.* Разработка методов символической динамики для системного анализа кардиологических процессов : Автореф. дис. ... к. тех. наук. Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2012. 20 с.

8. *Гуров Ю.В., Загускин С.Л.* Хронодиагностические возможности метода символической динамики // Терапевтич. архив. 2011. Т. 83, № 4. С. 23–26.

9. *Загускин С.Л.* Ритмы клетки и здоровье человека. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2010. 296 с.

10. *Крылов А.К. и др.* Объективация системных показателей состояния организма: от физиологического процесса к последовательности символов // Пятая международная конференция по когнитивной науке : тезисы докладов : в 2 т. Калининград, 2012. Т. 2. С. 477–478.

11. *Крылов А.К. и др.* Адаптация организма человека к неблагоприятным факторам внешней среды // Вестник Российского гуманитарного научного фонда. 2012. № 3 (68). С. 137–146.

12. *Созинова И.М. и др.* Системный анализ нравственного развития: решение моральных дилемм «свой»/«чужой» на последовательных стадиях онтогенеза // Материалы 4-й Всероссийской конференции «Психология индивидуальности». М. : Логос, 2012. С. 119.

13. *Загускин С.Л. и др.* Биорезонанс и информационная функция как объективные показатели адаптации организма человека к внешней среде // Время и информация : сб. научн. тр. / под ред. В.С. Чуракова. Новочеркасск : Изд-во «НОК», 2011. С. 34–43. (Сер. «Библиотека времени» ; вып. 8).

14. *Загускин С.Л. и др.* Адаптация организма человека к ритмам внешней среды и космической погоды // IX междун. Крымская конф. «Космос и биосфера». 2011. С. 22–24.

Творчество и измененные состояния сознания в контексте нелинейной динамики

В.А. Куприянова

Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург
valeryiva@yandex.ru

Академик Наталья Петровна Бехтерева утверждала, что вовлечение человека в творческий процесс со всеми сопровождающими его перестройками в мозге и организме и приводит к статистически оправданной удивительной ситуации, когда «умные живут дольше». Оживает мозг, оживает и организм. Существующие связи между клетками и структурами мозга становятся более активными, образуются новые связи и, скорее всего, новые клетки, нейроны [1]. При этом клеточные механизмы творческого мышления, как и мышления вообще, остаются неясными.

В 2012 году К.В. Анохин предложил концепцию, согласно которой нелинейная ассоциативная память обеспечивает связь между далеко отстоящими друг от друга элементами индивидуального опыта по механизму нейронной «кротовой норы» [2].

Мы предполагаем, что подобный механизм может иметь место в творческом процессе, когда в мозге на основе уже хранящейся информации нелинейно происходит образование новых функциональных связей и, соответственно, синтез нового видения проблемы. Эта гипотеза объясняет особую роль творчества у пожилых людей: нелинейная передача нервных импульсов помогает преодолеть влияние нейродегенеративных процессов, неизбежных при старении.

В результате мы имеем примеры особого долголетия творческих людей. Фактор витальности многих гениев отчетливо выступает в форме их долгожития и устойчивости творчества по отношению к «паспортно-старческому» возрасту. Софокл написал «Царя Эдипа» в 90 лет. Фирдоуси слагает «Шехнаме» до самой смерти. Умер он в 85 лет, и смерть его ускорена реальным, тяжелым оскорблением со стороны шаха Магомета. Микеланджело в 73 года становится архитектором собора Святого Павла. Монтеверди пишет оперу «Поппея» в 75 лет. Хокусаи создает свои картины и в 90-летнем возрасте. В 76 лет Гете начинает вторую часть «Фауста» и заканчивает ее в год смерти (82). Верди пишет в 73 года оперу «Отелло», а в 80 лет заканчивает «Фальстафа». Вагнер к 80 годам создает «Парсифаля». Беранже пишет стихи до 77 лет. Лев Толстой творил до 82 лет, И.П. Павлов – до 87, Диоген и Демокрит – и после 80 лет, Б. Шоу – до 94 лет. Вольтер написал первую поэму четырехлетним, а последнюю – восьмидесятичетырехлетним. Во всех этих случаях характерно, что старело тело, но творческое начало сохранялось за счет могучих компенсаторных механизмов [3].

Выделяя признаки творческого акта, практически все исследователи творчества и сами творцы подчеркивали его бессознательность, спонтанность, неконтролируемость волей и разумом, а также измененность состояния сознания. Блуждающий «глаз» ума – образ, достаточно точно передающий основу креативности человека. Ум должен быть децентрализован, расфокусирован, должен совершать свободные движения между векторами направленной активности. Методы активизации креативного мышления сопоставимы с техникой расширения сознания в йоге и с психоделическим опытом. При этом психике присуща абсолютная гибкость и ничем не ограниченная свобода, имеет место спонтанная смена настроений и чувств [4].

В то же время спонтанно возникающие измененные состояния сознания (ИСС) свойственны не только творческим натурам: они могут появляться как при обычных условиях (например, при засыпании либо значительном напряжении), так и при необычных, но естественных обстоятельствах (в частности, при нормальных родах), а также в необычных или экстремальных условиях жизни и работы здорового человека [5].

Одной из характерных черт ИСС является нарушение восприятия не только времени, но и пространства (при этом выраженное изменение субъективного восприятия времени признается в психофизиологии как признак дестабилизации функционального состояния [6]): могут наблюдаться искажения восприятия (перцептивные аберрации), изменения образа тела, пространственная деперсонализация [7]. Перестройки режимов работы системы при изменении ее параметров являются объектом изучения в нелинейной динамике (их называют бифуркациями). В результате нелинейность восприятия пространства-времени или нарушение линейности восприятия пространства-времени можно рассматривать как одну из характерных черт ИСС, наряду с выраженным изменением когнитивного функционирования.

В 1973 году Эрика Бургиньон показала, что около 90 % культур имеют институализированные формы ИСС [8], т. е. их можно найти в большинстве человеческих сообществ, и они являются нормальными. Культуры, которые ценят перцептивное разнообразие (полифазное сознание), более адаптивны, чем те, которые его не ценят. Однако в настоящее время трансрациональное сознание девальвируется во многих обществах, по мере того как заменяется монофазным сознанием «развитых» наций [9].

В своей работе мы предположили, что склонность к переживанию ИСС может быть биологическим, генетически обусловленным свойством когнитивных процессов индивидуума или популяции, необходимым для адаптации, и изменяться с возрастом [10].

Исследование проводилось в Санкт-Петербурге среди обычного городского населения; ни один из респондентов специально не занимался какими-либо психотехниками, связанными с индукцией ИСС. Работа состояла из психологического опроса и генотипирования. Основную группу (пожилых) составили 173 человека обоих полов в возрасте от 65 до 98 лет (средний возраст – 79,97 года), наблюдаемых на базе стационара городского медико-социального геронтологического центра, без выраженных признаков сенильной деменции и иных психических заболеваний. Контрольную группу составили 102 волонтера в возрасте 18–32 лет.

Различные спонтанные проявления измененных состояний сознания, согласно опроснику ИМЧ РАН, встречались практически у всех респондентов, но в разной степени. Среди основной группы (пожилых) нам удалось выявить 14 человек, которые переживали эпизоды одного из наиболее ярких проявлений ИСС – пространственной деперсонализации — наряду с другими признаками. При этом эпизоды выраженного изменения восприятия времени описывали только три респондента. В то же время больше половины (67 %) опрошенных говорили, что в старости время «летит» гораздо быстрее, чем в молодости. Возможно, это обусловлено не только физиологическими причинамию Такое представление также можно предположительно рассматривать как особый механизм, играющий важную роль в адаптации к возрастному стрессу, позволяющий легче прожить последние годы.

В контрольной группе нам удалось выявить 21 человека с эпизодами пространственной деперсонализации и 33 человека с эпизодами выраженного изменения восприятия времени (как правило, в экстремальных или стрессовых ситуациях). Подобные распространенные сдвиги когнитивного функционирования подтверждают номологический, защитный характер ИСС. В результате изменения восприятия пространства-времени можно рассматривать не только как одну из характерных черт ИСС, но и как возможный адаптационный механизм человеческой психики.

Изменения восприятия пространства-времени можно объяснить нелинейным характером восприятия в таких состояниях, которое, по-видимому, очень пластично. При этом мы видим существенный спад частоты ИСС в группе пожилых, что, вероятно, объясняется снижением лабильности функциональной активности центральной нервной системы при старении.

Также нам удалось показать возможную генетическую предрасположенность респондентов к переживанию ИСС. В результате генотипирования респондентов методом полимеразной цепной реакции была показана корреляция носительства длинного аллеля (L) гена транспортера серотонина с проявлениями ИСС. Этот трансмембранный белок осуществляет обратный захват медиатора из синаптической щели в пресинаптические окончания и определяет время действия медиатора на постсинаптические рецепторы. Ген серотонинового транспортера локализован в длинном плече 17 хромосомы 17q11.1 – q12, состоит из 14 интронов и 15 экзонов, 13 из которых являются кодирующими. 5’-регуляторная (промоторная) область гена 5HTT полиморфна и может нести инсерцию (вставку, L-аллель) или делецию (потерю, S-аллель) фрагмента из 43 пар нуклеотидов [11].

Носительство генотипа LL, приводящее к более быстрому удалению свободного 5-НТ из межклеточного пространства, может играть роль фактора, облегчающего адаптационные реакции ЦНС на физические нагрузки, требующие выносливости, что подтверждается повышенной встречаемостью генотипа LL среди спортсменов [12, 13]. В работах, посвященных творческим способностям, полиморфизмы гена серотонинового транспортера ассоциируются со способностями к танцу [14], а также к вербальной и образной креативностью [15], с религиозно-психологическими установками [16].

В то же время в результате статистической обработки нами не была обнаружена связь признаков ИСС с творческими способностями, а также выраженностью внутренних (интринзивных) религиозно-психологических установок [17]. Это позволяет отвергнуть гипотезу о том, что возникновение ИСС связано с активностью творческого воображения: они были показаны как особая сфера психической жизни.

Таким образом, в данной работе рассмотрены два независимых свойства человеческой психики – способность к творчеству и переживанию ИСС, которые можно отнести к нелинейным психологическим процессам. В результате проведенного исследования дальнейшее их изучение не только с точки зрения генетики, но и с позиций нелинейной динамики кажется нам обоснованным и перспективным.

Исследование было поддержано РФФИ, грант 09-06-00012а, и грантом НШ-3318.2010.4.

Литература

1. *Бехтерева Н.П.* Магия мозга и лабиринты жизни. М. ; СПб. : Сова, 2007. С. 312–334.

2. *Anokhin K.V.* Cognitome – a theory of embodied degrees of freedom of the brain // Пятая международная конференция по когнитивной науке, Калининград, 18–24 июня 2012. С. 429–430

3. *Эфроимсон В.П.* Педагогическая генетика // Наука. Письмо в редакцию. 1998. № 8. С. 118–125

4. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П* Синергетика: нелинейность времени и ландшафты коэволюции. М. : КомКнига, 2007. С. 27.

5. *Спивак Л.И., Спивак Д.Л.* Изменённые состояния сознания: типология, семиотика, психофизиология // Сознание и физическая реальность. 1996. Т. 1, № 4. С. 48–55.

6. *Спивак Л.И., Спивак Д.Л.* Феномен выхода из тела // Сознание и физическая реальность. 1998. Т. 3, № 6. С. 36–42.

7. *Тарт Ч.* Измененные состояния сознания / пер. с англ. Е. Филиной, Г. Закарян. М. : Эксмо, 2003. С. 288.

8. *Bourguignon E.* (*Ed.*) Religion, Altered-states-of Consciousness, and Social Change. Columbus: Ohio State University Press, 1973.

9. *Lumpkin T.W.* Perceptual diversity: is polyphasic consciousness necessary for global survival? Windhoek, Namibia : UNICEF-Namibia, 1998.

10. *Куприянова В.А.* Адаптационный потенциал измененных состояний сознания // Тезисы доклада на Первой международной конференции «Психотехники и изменённые состояния сознания в истории религий» (РХГА и РГПУ), г. Санкт-Петербург, 14–15.12.2012.

11. *Murphy D.L. et al.* How the serotonin story is being rewritten by new gene-based discoveries principally related to SLC6A4, the serotonin transporter gene, which functions to influence all cellular serotonin systems // Neuropharmacology. 2008. V. 55, № 6. P. 932–60.

12. *Langfort J., Barańczuk E., Pawlak D., Chalimoniuk M., Lukacova N., Marsala J., Górski J.* The Effect of Endurance Training on Regional Serotonin Metabolism in the Brain During Early Molecular Stage of Detraining Period in the Female Rat // Cellular Neurobiology. 2006. V. 26, № 7/8. P. 1327–1342.

13. *Sysoeva O.V., Maluchenko N.V., Timofeeva M.A., Portnova G.V., Kulikova M.A., Tonevitsky A.G., Ivanitsky A.M.* Aggression and 5HTT polymorphism in females: study of synchronized swimming and control groups // Int. J. Psychophysiol. 2009. V. 72, № 2. P. 173–178.

14. *Bachner-Melman R., Dina C., Zohar A.H., Constantini N., Lerer E., et al.* AVPR1a and SLC6A4 Gene Polymorphisms Are Associated with Creative Dance Performance // PLoS Genet. 2005. V. 1(3): e42. doi:10.1371/journal.pgen.0010042.

15. *Volf N.V., Kulikov A.V., Bortsov C.U., Popova N. K.* Association of verbal and figural creative achievement with polymorphism in the human serotonin transporter gene // Neuroscience Letters. 2009. V. 463. P. 154–157.

16. *Borg J., Andrée B., Soderstrom H., Farde L.* The serotonin system and spiritual experiences // Am. J. Psychiatry. 2004. V. 161(9). P. 1720-1; author reply 1721.

17. *Куприянова В.А., Захарчук А.Г., Спивак Д.Л.* Психологические резервы активного долголетия // Ученые записки СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова. 2011. Т. 18. С. 42–44.

Нарушения исполнительных функций у больных с аденомой гипофиза

З.К. Кушаев[1], Е.В. Гузанова[1], С.Б. Рогожкин[2]

[1]Нижегородская медицинская академия Министерства здравоохранения РФ
[2] Областная клиническая больница им. Н.А. Семашко, Нижний Новгород
zaur-kushaew-050892@yandex.ru

Введение

Аденомы гипофиза – это наиболее часто встречающиеся опухолевидные образования хиазмально-селлярной области, которые составляют до 18 % всех новообразований головного мозга у взрослых. В большинстве случаев это доброкачественные и сравнительно медленно растущие образования. Опухоли хиазмально-селлярной области тесно взаимодействуют с важными структурами головного мозга, такими как внутренние сонные артерии и черепные нервы (III, IV, V), перекрест зрительных нервов (хиазма), гипоталамус, III желудочек и др. В связи с таким тесным взаиморасположением очевидно, что в этой области будут наблюдаться компрессионные явления, что будет выражаться в определенных нарушениях функций ЦНС. В нашей работе мы оценили те нейропсихологические нарушения, которые присущи больным с аденомой гипофиза.

Методы

Нами было обследовано 18 больных с аденомой гипофиза, их средний возраст составил (45,4 ± 2,2) года. Группу контроля составили 18 здоровых лиц, которые были подобраны соответственно полу и возрасту пациентов с аденомой гипофиза. Средний возраст составил (46,3 ± 3,1) года. В обеих группах отсутствовала соматическая патология. Всем больным и здоровым пациентам был сделан клинико-неврологический осмотр, оценены нейропсихологические функции по методике А.Р. Лурия: проба на динамический праксис (тест «Кулак – ребро – ладонь»), пробы на пространственный праксис (графическая проба, рисование куба, часов), проба на кратковременную память («Краткий тест заучивания 5 слов»), проба на тестирование внимания (проба «Пятый лишний»), проба на обобщение, абстрагирование, сравнение (тест на обнаружение сходства, «Понимание смысла сюжетной картинки»); использовался «Символо-цифровой тест Векслера», Шкала тревоги и депрессии. Всем больным проводилась МРТ головного мозга. Для подсчета показателей использовалась программа Statistica 6.0.

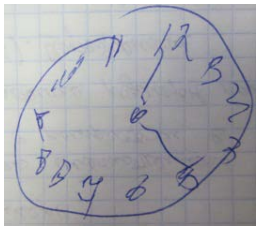


Рис. 1. Изображение циферблата часов больным с аденомой гипофиза. Нарушение правильного расположения цифр в круге, нарушение целостности круга, ошибки в расположении стрелок

Рис. 2. Изображение графической пробы у больного с аденомой гипофиза. Выражены дезингибиция, дезавтоматизация

Результаты

На основании клинико-неврологического осмотра у 57 % больных с аденомой гипофиза выявлено выпадение полей зрения. Средний уровень тревоги составил (6,3 ± 2,4) балла, средний уровень депрессии (4,4 ± 1,2) балла. При анализе МРТ головного мозга у всех больных выявлено наличие объемного образования ХСО, размерами варьирующимися от 0,3×0,3 мм до 23×14×39 мм. По данным МРТ, у 90 % больных имеется умеренная наружная гидроцефалия.

На основании нейропсихологического обследования у 100 % пациентов с аденомой гипофиза были выявлены нарушения при проведении теста «Кулак – ребро – ладонь», у 29 % – нарушения при проведении графической пробы; у 29 % – обнаружены ошибки при изображении куба, часов, в тесте на заучивание 10 слов среднее количество слов при кратком тесте заучивания составило 2,7 ± 2. При Символо-цифровом тесте Векслера число символов за 1 мин в среднем составило 29,7 ± 2. В тесте «Пятый лишний» 47 % больных допускали ошибки. Средний показатель в пробе обнаружения сходства составил (3,3 ± 0,5) балла. У 71 % больных выявлены ошибки при понимании смысла сюжетной картинки.

При сравнении двух групп были выявлены достоверные корреляции по результатам выполнения тестов «Кулак – ребро – ладонь», графической пробы, «Пятый лишний», на понимание смысла сюжетной картинки. Выраженность тревоги достоверно коррелировала с тестами «Кулак – ребро – ладонь», графической пробы, «Пятый лишний».

Заключение

У пациентов с аденомой гипофиза наиболее часто встречались ошибки в тестах, направленных на анализ функции лобных долей. Данные ошибки коррелировали с повышенным уровнем тревоги и были достоверно различимы по сравнению с группой здоровых лиц. Полученные результаты свидетельствуют о нейродинамических нарушениях у пациентов, однако, возможно, это связано с истинной дисфункцией лобной доли. Дифференцирование с истинной дисфункцией требует дальнейших исследований.

Синхронизация пластичной нейронной сети в условиях интерфейса управления мобильным роботом

С.А. Лобов[1], В.Б. Казанцев[1,2]

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
losa99@yandex.ru

Эффект нейрональной пластичности, как считается в нейронауке, является одним из основных клеточных механизмов обучения и памяти. К настоящему времени достаточно хорошо изучены молекулярно-клеточные преобразования, лежащие в основе различных форм пластичности на уровне отдельных клеток и синапсов. На уровне нейросетевых взаимодействий, формирования и настройки сетевой активности, задача о сетевых механизмах когнитивных функций остается практически неисследованной. Одним из подходов здесь является построение биологоподобных моделей нейронных сетей. Ключевым моментом на уровне сетевых моделей являются механизмы структурно-функциональных перестроек, происходящих в нейронных сетях при моделировании процессов обучения. Такие перестройки, в частности, были обнаружены в экспериментальных моделях кортикальных и гиппокампальных культур [1–3].

В исследованиях сетевых механизмов когнитивных функций одним из модельных подходов является использование так называемых нейроаниматов. Термин анимат (animal + automat), обозначающий робота с поведением животного, появился благодаря Wilson [4]. Позже несколько групп исследователей предложили концепцию создания гибридных систем, в которых роботом управляли живые нейронные сети. Основной идеей здесь было то, что обучение *in vivo* неразрывно связано с взаимодействием с внешней средой, и то же самое должно соблюдаться для обучения *in vitro*. Первый нейроанимат (еще одно название hybrot: hybrid living + robotic) был создан группой Mussa-Ivaldi, которая для управления роботом использовала сигналы с нейронов срезов мозга морской миноги [5]. Почти параллельно с этим Potter с коллегами предложил подключить к анимату культуру нейронов, выращенных на мультиэлектродной матрице [6]. Анализируя ряд работ в этом направлении [7, 8], выполненных в последнее десятилетие, можно прийти к заключению, что нейроанимат применялся главным образом в качестве индикатора структурно-функциональных перестроек нейронной сети, возникших благодаря внешней стимуляции.

Ранее [9] нами был предложен подход, позволяющий изменять структурно-функциональные характеристики модельной сети с помощью длительной стереотипной стимуляции. Функциональные изменения выражались в возникновении синхронизации пачечных сетевых ответов с внешним стимулом (рис. 1). В основе синхронизации лежали структурные перестройки сети в виде пространственного перераспределения весов связей и потенцирования кратчайших путей распространения возбуждения от стимулятора к внешним краям сети.

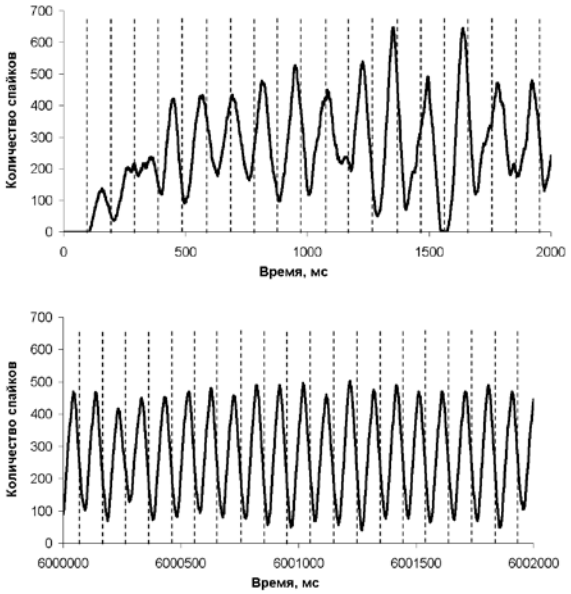


Рис. 1. Активность сети (количество спайков в интервале 50 мс) при включении стимуляции 10 Гц (*вверху*) и ее синхронизация с наносимыми стимулами спустя некоторое время (*внизу*). Вертикальными пунктирными линиями отмечено время нанесения стимула

В представляемой работе была решена задача построения нейроанимата, управляемого модельной нейронной сетью с пластичностью. При этом требовалось найти ответы на следующие вопросы:

1. Возможно ли получить эффект синхронизации в модельной сети при внешней стимуляции, параметры которой будут определяться взаимодействием мобильного робота с внешней средой? В частности, будет ли иметь место синхронизация в условиях эпизодической стимуляции с вариабельной частотой?

2. Каким образом регистрировать моменты синхронизации в условиях нестационарной стимуляции? Возможно ли использовать нейроанимат в качестве индикатора синхронизации?

3. Можно ли при создании нейроанимата ограничиться исключительно принципами нейроуправления без каких-либо внешних по отношению к нейронной сети алгоритмов? В экспериментальных работах с кортикальными и гиппокампальными культурами данный вопрос не ставился и в качестве управляющих сигналов для робота использовались либо вычисляемые сетевые харак-

теристики [10], либо машинная классификация паттернов активности [6, 8, 11].

Математическая модель пластичной нейронной сети строилась следующим образом. Изменения трансмембранного потенциала нейронов определялись моделью Ижикевича [12] с тем отличием, что к синаптическому току добавлялась шумовая компонента. Кратковременная синаптическая пластичность моделировалась способом, описанным Tsodyks с соавт. [13], – в виде изменения величины выбрасываемого при спайке синаптического ресурса в зависимости от частоты спайков. Зависимость изменения силы связи от соотношения времен спайков на пре- и постсинапсе учитывалась в рамках модели долговременной пластичности STDP, описанной в [14]. Если спайк пресинаптического нейрона приводил к генерации спайка на постсинпаптическом, то связь между этими двумя нейронами усиливалась. Если постсинаптический нейрон генерировал спайк раньше пресинаптического – связь между ними ослаблялась. Топологически нейронная сеть в программе представляла собой граф с нейронами в узлах, спайки от одного нейрона к другому приходили с задержками, пропорциональными расстоянию между ними.

Для модельных экспериментов генерировалась сеть, имеющая 400 возбуждающих и 100 тормозных нейронов. Каждый нейрон имел в среднем 30 входящих соединений, вероятность связывания зависела от расстояния: близлежащие нейроны связывались с большей вероятностью, чем дальние. Первоначально веса связей составляли значение 0,5 ± 0,1.

Для стимуляции модельной нейронной сети использовали виртуальный генератор прямоугольных импульсов. При этом амплитуда импульсов составляла 50 мВ, продолжительность 5 мс. В экспериментах без робота (при исследовании диапазона стимуляции) частота следования импульсов задавалась определенным значением из диапазона 0,1–100 Гц. В нейроаниматном исследовании частота определялась сигналом ультразвукового датчика, расположенного на роботе. Ее значение было обратно пропорционально расстоянию до объекта. Виртуальный генератор подключался к произвольно выбранному участку сети, включающему 5 возбуждающих и 1 тормозной нейрон.

Для построения мобильного робота использовался набор LEGO NXT Mindstorms ®. Связь компьютера, на котором осуществлялось моделирование нейронной сети, и робота осуществлялась через Bluetooth ® интерфейс.

Исследуем сначала возможность вынужденной синхронизации сети внешним сигналом. На рисунке 2 представлены результаты исследования действия стимуляции с разной частотой на модельную сеть без пластичности и с пластичностью в виде STDP. В случае с STDP-пластичностью наблюдалась четкая синхронизация с определенной фазовой задержкой (отставание ответа сети от начала нанесения стимула) в широком диапазоне частот (0,7–11 Гц). В случае без пластичности синхронизация развивалась в более узком диапазоне (5–8 Гц), имела менее стабильный и больший по значению фазовый сдвиг. Таким образом, долговременная синаптическая пластичность в виде локального синаптического правила STDP значительно расширяла диапазон синхронизации нейронной сети с внешним сигналом. Для дальнейших исследований было решено использовать диапазон стимуляции, который вызывал синхронизацию только после структурных перестроек сети, опосредованных STDP-пластичностью – 8–11 Гц.

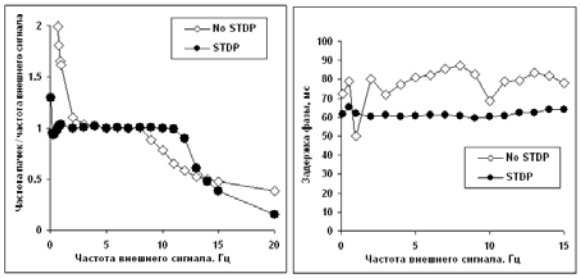


Рис. 2. Соотношение частота пачек – частота стимуляции (*слева*) и задержка ответа сети (*справа*) в зависимости от частоты внешнего сигнала в варианте с долговременной пластичностью (STDP) и без пластичности (No STDP)

Для детектирования структурно-функциональной перестройки сети под воздействием стимуляции, рассмотрим следующие критерии синхронизации на нейрональном уровне:

1) значение частоты спайков в диапазоне 8–11 Гц;

2) фазовый сдвиг спайков относительно моментов нанесения стимула в диапазоне 60–70 мс.

Отметим, что каждых их этих критериев по отдельности не отражает наличие синхронизации. В несинхронизированной сети отдельные нейроны могли демонстрировать высокочастотную активность, и время от времени возбуждение отдельных нейронов могло отставать от момента нанесения стимула на 60–70 мс. Поэтому учитывались одновременно оба критерия. Для реализации такого подхода использовались последовательно соединенные нейронные фильтры фазы и частоты. Нейроны, составляющие эти фильтры, добавлялись к основной сети дополнительно, и их параметры настраивались вручную для достижения желаемых диапазонов фильтрации.

Фазовый фильтр был реализован с помощью аксональных задержек двух тормозных нейронов, включенных между стимулируемым участком нейрональной сети и нейроном-детектором (рис. 3). При этом один из тормозных нейронов подключался по геометрически короткому пути и подавлял возбуждающие спайки во временном диапазоне примерно 20–60 мс после момента нанесения стимула. Второй тормозный нейрон располагали на большом расстоянии от детектора, обеспечивающем отсечение возбуждения во временном диапазоне примерно 70–120 мс после момента

нанесения стимула. Таким образом, благодаря тормозным входам спайки на нейроне-детекторе могли генерироваться в основном в диапазоне 60–70 мс после момента нанесения стимула.

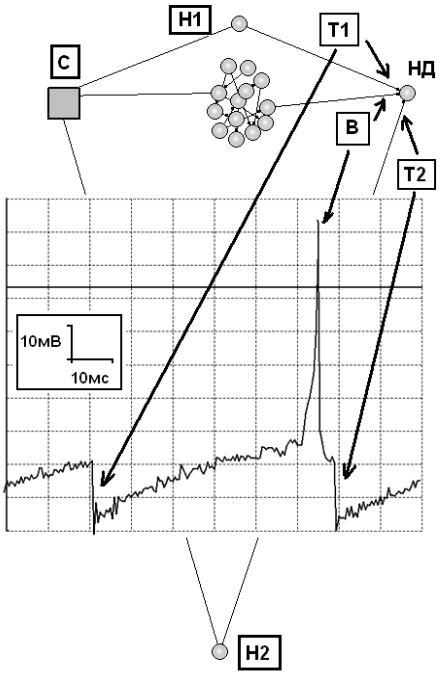


Рис. 3. Нейронный фазовый фильтр. Спайк на нейроне-детекторе (НД) генерируется только в случае прихода спайка по возбуждающему входу от сети (В) в диапазоне от 60 до 70 мс от момента импульса на стимуляторе (С). Тормозной вход Т1 от вспомогательного нейрона Н1 подавляет «ранние» спайки, а вход Т2 от нейрона Н2 – «поздние»

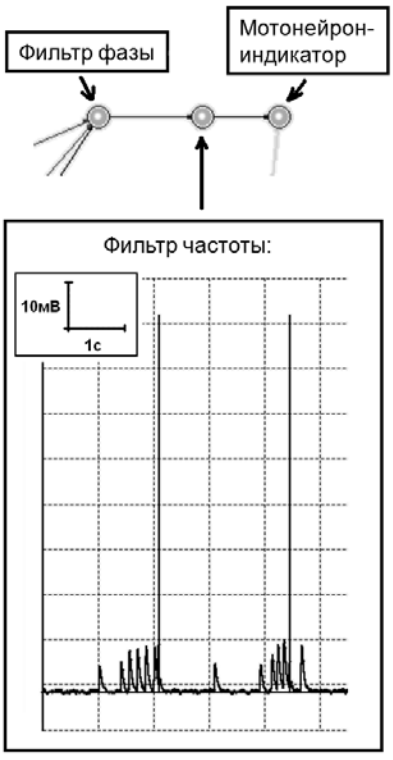


Рис. 4. Нейронный фильтр частоты, выполненный на основе эффекта фасилитации. Спайки генерируются только в случае высокочастотной активности (> 8 Гц)

Нейронный фильтр частоты реализован с помощью эффекта пресинаптической фасилитации в рамках модели краткосрочной синаптической пластичности Tsodyks и Markram. Параметры нейрона-фильтра были подобраны таким образом, что количество синаптического ресурса с каждым новым импульсом возрастало при частоте следования импульсов более 8 Гц. Соответственно спайки на постсинаптическом нейроне генерировались только в случае высокочастотной активности пресинаптического нейрона (рис. 4).

Нейронная сеть анимата включала в себя основную часть и дополнительные нейроны (рис. 5, 6). При этом основная часть с STDP-пластичностью была такой же, как в исследованиях по изучению синхронизации. Дополнительные нейроны – мотонейроны, нейроны-детекторы – добавлялись и конфигурировались «вручную», долговременная пластичность на соединения этих нейронов не распространялась.

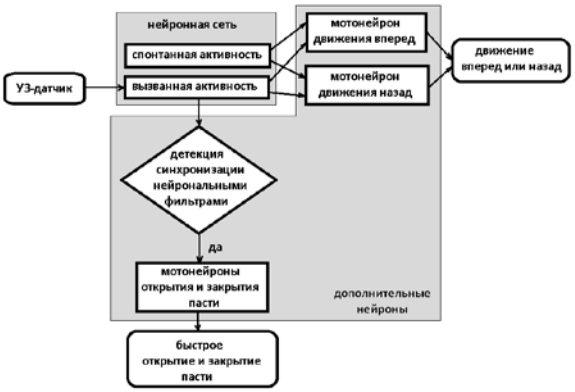


Рис. 5. Блок-схема нейроанимата

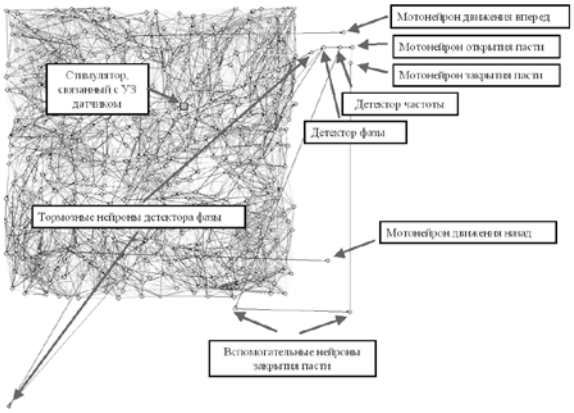


Рис. 6. Нейронная сеть нейроанимата с дополнительными нейронами

Благодаря спонтанной активности нейронной сети робот время от времени (1–2 раза в минуту) начинал двигаться вперед или, реже, назад. В случае нахождения какого-либо объекта в поле «зрения» робота включалась стимуляция, приводящая к резкому повышению активности нейронной сети. В итоге внешне «поведение» анимата выглядело так, что он реагировал на появление объекта скачками вперед. При контакте с объектом робот либо сдвигал его в сторону, либо поворачивался

сам. Сочетание спонтанной и вызванной активности нейронной сети приводило к тому, что даже в случае отсутствия каких-либо объектов в непосредственной близости от себя анимат время от времени начинал двигаться, «находя» себе внешнее сенсорное воздействие в виде неподвижных предметов или стен помещения.

При возникновении в сети высокочастотной синхронизации спайки пропускались фильтрами фазы и частоты, что приводило к активации мотонейронов, осуществляющих быстрое открытие и закрытие пасти (рис. 7).

Было проведено несколько экспериментов, в которых нейроанимат демонстрировал синхронизацию спустя 2–3 часа от начала взаимодействия с внешней средой. Это можно трактовать так, что анимат в начале своей «жизни» мог реагировать на объекты, только приближаясь или удаляясь от них, а впоследствии «обучался» реагировать на близкорасположенные объекты открытием и закрытием пасти.

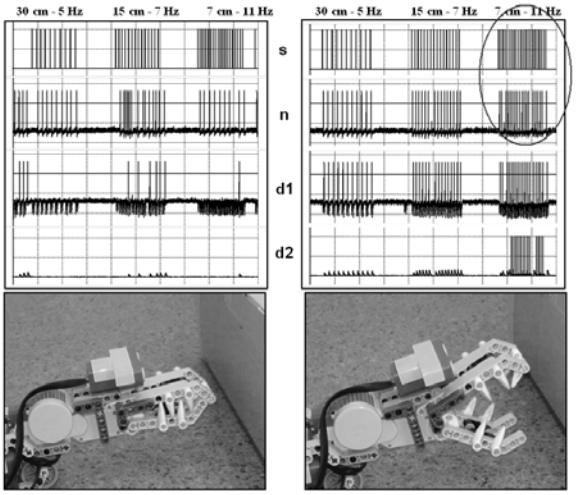


Рис. 7. Индикация эффекта синхронизации с помощью нейроанимата: s – сигнал виртуального стимулятора, соединенного с УЗ-датчиком, n – запись с нейрона основной сети, d1 – запись с нейрона – фазового фильтра, d2 – запись с нейрона – фильтра частоты. *Слева* – начало эксперимента, *справа* – после периода естественной стимуляции внешней средой. Окружностью показан момент синхронизации ответов сетевого нейрона с наносимой стимуляцией

Итак, сенсорное воздействие извне посредством стимуляции может вызвать структурно-функциональную перестройку нейронной сети. В основе этой перестройки на сетевом уровне лежат пластические изменения по правилу STDP на синаптическом уровне. В свою очередь, эта перестройка может приводить к изменению «поведения» анимата. Таким образом, на простейшем случае одноканальной стимуляции модельной сети показана взаимосвязь синаптического, сетевого и «поведенческого» уровня. В дальнейшем можно усовершенствовать «поведение» робота при усложнении применяемых в моделях правил синаптической пластичности и приближении их к тем, что имеют место в живых нейронах, а также при усложнении стимуляции с помощью увеличения количества электродов и з комбинирования очередности их срабатывания. При этом, на наш взгляд, основной задачей будет именно понимание взаимосвязей различных уровней – от синаптического до сетевого и поведенческого.

Работа поддержана грантами ФЦП (контракты № 8055, 14.B37.21.0194, 11.519.11.1003), грантом РФФИ (№ 13-02-01223 А) и программой МКБ РАН.

Литература

1. *Shahaf G., Marom S.* Learning in networks of cortical neurons // J. Neurosci. 2001. V. 21. P. 8782–8788.

2. *Marom S., Shahaf G.* Development, learning and memory in large random networks of cortical neurons: lessons beyond anatomy // Q. Rev. Biophys. 2002. V. 35. P. 63–87.

3. *Мухина И.В., Иудин Д.И., Захаров Ю.Н., Симонов А.Ю., Пимашкин А.С., Казанцев В.Б.* // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. Т. 3 : Фундаментальные проблемы науки. М. : НИЯУ МИФИ, 2010. С. 184–192.

4. *Meyer J.A., Wilson S.W.* From Animals to Animats : Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. Cambridge : MIT Press, 1991.

5. *Reger B.D., Fleming K.M., Sanguineti V., Alford S., Mussa-Ivaldi F.A.* Connecting brains to robots : The development of a hybrid system for the study of learning in neural tissues // Proc. of the VII Intl. Conf. on Artificial Life. 2000. P. 263–272.

6. *DeMarse T.B., Wagenaar D.A., Blau A.W., Potter S.M.* The Neurally Controlled Animat : Biological Brains Acting with Simulated Bodies // Autonomous Robots. 2001. V. 11 P. 305–310.

7. *Bakkum D.J., Chao Z.C., Potter S.M.* Spatiotemporal electrical stimuli shape behavior of an embodied cortical network in a goal-directed learning task // J. Neural Engineering. 2008. V. 5. P. 310–323.

8. *Shahaf G., Eytan D., Gal A., Kermany E., Lyakhov V. et al.* Order-Based Representation in Random Networks of Cortical Neurons // PLoS Comput Biol. 2008. V. 4, № 11. e1000228. doi:10.1371/journal. pcbi.1000228.

9. *Лобов С.А., Казанцев В.Б.* Адаптивные перестройки в модели пластичной нейрональной сети под воздействием длительной стереотипной стимуляции // Труды конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». Н. Новгород, 2011.

10. *Bakkum D.J., Shkolnik A.C., Ben-Ary G., Gamblen P., DeMarse T.B., Potter S.M.* Removing some 'A' from AI: Embodied Cultured Networks // Embodied Artificial I-telligence. 2004, Iida, F.

11. *Chao Z.C., Bakkum D.J., & Potter S.M.* Region-specific network plasticity in simulated and living cortical networks: Comparison of the center of activity trajectory (CAT) with other statistics // J. Neural Engineering. 2007. V. 4. P. 294–308.

12. *Izhikevich E.M.* Which Model to Use for Cortical Spiking Neurons? // IEEE Transactions on neural networks. 2004. V. 15, № 5. September. P. 1063–1070.

13. *Tsodyks M., Pawelzik K., Markram H.* Neural Network With Dynamic Synapses // Neural Comput. 1998. V. 10. P. 821–835.

14. *Morrison A., Diesmann M., Gerstner W.* Phenomenological models of synaptic plasticity based on spike timing // Biol. Cybern. 2008. V. 98. P. 459–478.

Проблема создания «образного» Интернета

Г.В. Лосик, В.В. Ткаченко

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск
georgelosik@yahoo.com

Введение

Интерфейс пользователя Интернета все время совершенствуется. Поиск информации в нем сейчас осуществляется по лингвистическому принципу. При информационном запросе «поисковики» ищут в сети Интернета сходные по лингвистической структуре тестовые аналоги запрошенному ключевому слову. Мера сходства оценивается по критериям лингвистической метрики. Вместе с тем в настоящее время интенсивно ведется разработка нового принципа поиска образной информации в сети, поиска «по картинке». Фирма Google уже реализует режим поиска в базе данных информации по двумерной картинке, введенной вместо ключевого слова пользователем как запрос. Благодаря современной технологии трехмерного кодирования, сканирования, анализа трехмерных объектов и предметных сцен на серверах сегодня выложено много трехмерных моделей предметов. Разрабатывается метрика сравнения их по форме, текстуре, цвету. Эта метрика и принцип оценки сходства трехмерных фигур, сцен, их динамик альтернативна лингвистическому принципу. К решению указанных «образных» задач подключились когнитивные психологи, занимающиеся зрительным восприятием, изучением трекинга взора смотрящего, психомоторики рук, перцептивных действий.

Субъективность визуализации формы

Форма предмета при цифровом математическом моделировании задается поверхностью в 3D-пространстве, представленной множеством покрывающих ее треугольников-полигонов. Детальность моделируемой поверхности зависит от детальности и числа полигонов. В сеансах Интернета форма объекта представляется пользователю для принятия им о ней того или иного решения. Эту операцию называют визуализацией (она может быть и не обязательной в ходе чисто математических операций с формой). Для задач визуализации дополнительно к модели предмета вокруг него в 3D-пространстве задается еще математически позиция наблюдателя. Она задается азимутными координатами местонахождения наблюдателя, вектором направления взора на предмет и вторым вектором (если визуализация стереоскопическая) – наклона головы наблюдателя, отражающей наклон линии, соединяющей два глаза.

Предметы материального мира отличаются формой. Человек различает предметы по форме очень легко [1, 2]. Но принципы кодирования и запоминания в мозге формы трехмерных предметов, сопоставления реализации с эталоном до настоящего времени остаются неизвестными [3]. Очевидно, что в мозге имеются механизмы не цифровой, а аналоговой обработки трехмерных форм и их сравнения [4]. Изучение этих механизмов становится актуальным с позиции теории кодирования в связи с созданием «образного» Интернета [5].

С точки зрения психологической теории деятельности (А.Н. Леонтьев) актуально возвратить пользователю компьютера в сеансе работы привычный принцип «предметности» восприятия и мышления. Этот принцип соответствует кодированию информации в компьютере не цепочкой символов, а «образом», и является антропоморфным, так как в метрике компьютерного образа появляется объективная информация о субъективности действий каждого индивида с объектом.

Переход к трехмерности

Задача автоматического распознавания зрительных образов усложняется в математическом плане, когда она переносится из двумерного представления распознаваемого предмета в трехмерное представление его формы. Возможны две стратегии решения этой задачи. По первой распознавание проводится «двумерным» путем и решение о степени сходства трехмерных объектов принимается по сходству двумерных видеоизображений реализации X и эталона A, полученных из разных ракурсов, т. е. точек зрения на трехмерный предмет. Распознавание проводится по карте кругового двухмерного его осмотра. По второй стратегии распознавание проводится «трехмерным» путем. В этом случае разрабатывается многопараметрический *критерий* метрического сопоставления математически заданных поверхностей многоугольников в 3D-пространстве. В пространстве признаков вычисляется мера близости X и A.

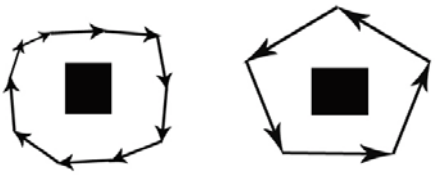
Однако если в прошлом при сравнении двумерные видеоизображений не было проблемы *субъективности* выбора точки взора на 3D-предмет, то в «трехмерной» задаче резко возрастает зависимость интегральной многопараметрической оценки сходства реализации X и эталона A от *субъективности математика*, от его волеизъявления относительно того, с какой точки в 3D-пространстве смотреть на объект, а с какой не смотреть, какие грани и линейные размеры многоугольников считать важными, а какие неважными. Словами Альберта Эйнштейна, тематическое решение задачи требует введения понятия наблюдателя, так как оно начинает зависеть от его местоположения в 3D-пространстве.

В «трехмерном» случае математикам еще более сложно, чем в «двумерном», интуитивно «угадать» те точки взора на предмет, которые выбирает в практической жизни человек, когда в психике формирует образ этого предмета. Во-первых, в реальной жизни человек осматривает объект только с реально доступных точек взора. В отличие от него компьютер, имея математические модели замкнутых поверхностей форм объектов, автоматически сравнивает их и с нереальных точек взора. Во-вторых, в реальной жизни карта кругового осмотра нового 3D-объекта у человека зависит от *цели* его деятельности и от *функции* этого объекта в его жизни как субъекта. В то же время в математической модели 3D-объекта карта поверхности формы предмета строго объективная.

Решение задачи. Форма предмета – это не только метрическое явление, но и топологическое [4, с. 87]. Поэтому на основании лишь объективных параметров формы выработать единый «объективный» *критерий* сходства предметов невозможно. Зрительные ассоциации возникают не только из-за метрического сходства форм двух ассоциированных предметов. Они возникают также из-за сходства субъективного осмотра и взаимодействия человека с данными предметами [6]. Поэтому сегодня актуально разработать концепцию «образного» Интернета, в которой критерий сходства трехмерных предметов строится как на объективной информации о них, так и на информации о субъективном отношении к ним человека.

Память человека использует в своей работе ассоциации по сходству. Зрительные ассоциации реализуются преимущественно на основе сходства трехмерных предметов по форме. При всем этом зрительная ассоциативная реакция на увиденный предмет строится как на объективной информации о сходстве трехмерных предметов, так и на информации субъективного отношения к нему. Субъективное отношение трудно измеримо количественно. Психология образного восприятия каждого индивида очень специфична. На основании экспериментальных исследований психологами высказана идея добавить к объективной метрике параметров компьютерного образа предмета еще и информацию о действиях субъекта с этим предметом. В этом случае *персонализированный* «образный» Интернет становится реальным [3].

Субъективные шкалы оценки предметов по форме, «симпатии» к ним количественно могут быть определены, во-первых, применением метода многомерного шкалирования. Во-вторых, количественным методом является окулография, регистрация траектории осмотра и ощупывания трехмерного предмета. Поэтому возможны две дополняющие друг друга «техники» измерения «субъективной» компоненты в образе предмета в долговременной памяти человека. Первая – это «карта кругового осмотра» предмета субъектом (см. рисунок) и вторая – оценка сходства данного предмета по методике многомерного шкалирования с набором других предметов.



Геометрический вид
карты кругового осмотра объекта

Результаты

В плане реализации вышеописанной идеи была разработана лабораторная модель «образного» Интернета. Для нее были реализованы три программных модуля для взаимодействия пользователя персонального компьютера с сервером. Первый модуль визуализирует объемный виртуальный объект в 3D-режиме на 2D-дисплее. Второй модуль регистрирует «карту кругового осмотра» (рисунок) пользователем объекта. Осмотр объекта совершается через стрелки клавиатуры компьютера. Регистрируется местоположение виртуальной точки взора, удаленность смотрящего от объекта, продолжительность осмотра из данной точки. Третий модуль сегментирует траекторию осмотра на типичные для субъекта «маневры» осмотра, выявляет «любимые» места осмотра этого объекта у данного пользователя.

Указанные три программных модуля реализуют *первый* способ, или «технику», накопления в базе пользователя компьютера данных о субъективном отношении пользователя к конкретным объектам его повседневного обихода. Это когнитивная карта осмотра.

Второй способ, или «техника», – это выявление и накопление субъективных данных с помощью метода многомерного шкалирования объектов, т. е. выявления субъективных шкал оценки пользователем сходства формы объектов. Для выявления субъективных шкал разработан еще один пакет программных модулей.

Лабораторная модель «образного» Интернета, разработки ОИПИ НАН Беларуси, находится в стадии испытания ее модулей.

Литература

1. *Зинченко, В.П.* Формирование зрительного образа / В.П. Зинченко, Н.О. Вергилес. М. : МГУ, 1969. 287 с.
2. *Зинченко, В.П.* Образ и деятельность / В.П. Зинченко. М. : МГУ, 1997. 608 с.
3. *Лебедев, А.Н.* Нейронный код / А.Н. Лебедев // Психология. 2004. Т. 1, № 3. С. 18–36.
4. *Гончаров, О.А., Емельянова, Н.Е., Тяповкин, Ю.Н.* Топологический и метрический принципы обработки пространственной информации: перцептивные и возрастные закономерности / О.А. Гончаров, Н.Е. Емельянова, Ю.Н. Тяповкин // Психологический журнал. 2011. Т. 32, № 1. С 87–96.
5. *Лосик, Г.В.* Перцептивные действия человека: кибернетический аспект : монография / Г.В. Лосик. Минск : ОИПИ, 2008. 147 с.
6. *Соколов, Е.Н.* Восприятие и условный рефлекс. Новый взгляд / Е.Н. Соколов. М. : МГУ, 2003. 288 с.

Исследование межканальной синхронизации (симметричности) ЭЭГ в норме и при расстройствах шизофренического типа

А.В. Макаренко

Научно-исследовательская группа «Конструктивная Кибернетика», Москва
Институт проблем управления РАН, Москва
avm@rdcn.ru

Введение

Существует ряд заболеваний, которые характеризуются нарушением целостной психической деятельности. К их числу относится и шизофрения [1]. За всю историю изучения интегративных процессов в головном мозге человека при данном заболевании были накоплены богатые гистологические и физиологические свидетельства о нарушениях функциональной согласованности между различными отделами мозга [2, 3]. Это позволило К. Фристону выдвинуть гипотезу о дезинтеграции нейронных сетей при шизофрении [4]. Весьма информативно в этом плане проявило себя электроэнцефалографическое исследование [5–8].

Как правило, анализ синхронности ЭЭГ основан на классических корреляционно-спектральных методах [5], применяются также методы нелинейной динамики [6–8]. В последнее время активно развиваются подходы, исследующие синхронность ЭЭГ в нестационарном приближении [9, 10]. При этом исследуемая система и процессы, в ней протекающие, настолько сложны, что окончательного понимания многих аспектов ее устройства и функционирования сих пор не существует.

В докладе автора [11] предложен новый подход к оцениванию степени симметричности динамических процессов в расширенном пространстве состояний относительно парных перестановок их компонент. Причем анализ проводится не только для самого процесса, но и для его структурных составляющих [12]. В статье [13] показано, что данный метод позволяет количественно оценивать степень и параметры синхронизации хаотических колебаний и обнаруживает факт перестройки структуры аттракторов. Он устойчив не только к воздействию шума малой интенсивности, но и к нелинейному искажению анализируемого сигнала.

Здесь необходимо отметить, что симметрия сыграла и продолжает играть чрезвычайно важную роль в науке, особенно в математике, физике, химии и биологии. Изучение симметрий процесса, особенно многомерного, потенциально способствует более глубокому пониманию как его структуры и/или его характеристик, так и свойств систем, с ним связанных. Этот вывод основан на анализе опыта конструктивного применении методов теории симметрии к вопросам физики микро- и макромира [14], решения алгебраических уравнений [15, 16], а также дифференциальных уравнений [17], как обыкновенных, так и с частными производными.

Таким образом, применение данного подхода к исследованию ЭЭГ здоровых людей и больных шизофренией позволит получить количественные оценки и построить топографическую карту нарушений межканальной синхронности нейронной активности в различных отделах головного мозга при этом заболевании. Причем измерение степени межканальной симметричности ЭЭГ является новым инструментом исследования интегративных процессов в головном мозге, который может оказаться весьма информативным, в дополнение к уже существующим подходам и методам.

Анализ межканальной синхронности ЭЭГ

Первично обработанные записи ЭЭГ группы здоровых испытуемых и группы пациентов были предоставлены лабораторией нейрокомпьютерных интерфейсов биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, руководитель проф. А.Я. Каплан, в рамках соглашения о совместной работе.

Записи ЭЭГ делались у 45 мальчиков, страдающих расстройствами шизофренического типа (с клинически подтвержденным диагнозом, без фармакотерапии) и у 39 мальчиков, признанных здоровыми. Средний возраст обеих групп на момент обследования составил 12 лет и 3 месяца. Фиксация ЭЭГ проводилась в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами с использованием 16 отводящих электродов, установленных по стандартной схеме 10/20, монополярно относительно спаренных ушных электродов. Для каждого испытуемого проводилась запись ЭЭГ длительностью в 1–2 минуты. Рабочие каналы ЭЭГ: O1, O2, P3, P4, Pz, T5, T6, C3, C4, Cz, T3, T4, F3, F4, F7, F8. Все записи ЭЭГ прошли первичную обработку – редактирование с целью удаления артефактов и приведение к единому масштабу дискретизации (128 отсчетов в секунду).

Итак, каждая из ЭЭГ представляет собой векторную последовательность $\{\mathbf{s}_k^{(m)}\}_{k=1}^{K}$: $\mathbf{s}_k^{(m)} \in \mathbb{R}^{16}$, $K = 7680$. Все временные ряды эквидистанты: $\tau_s = 1/128$ с, $\tau_s = t_{k+1} - t_k$, $T_s = \tau_s \left(K - 1\right)$.

Всё множество предварительно обработанных ЭЭГ $\mathrm{E} \ni \{\mathbf{s}_k^{(m)}\}_{k=1}^{K}$ априорно разделено (на основе клинических диагнозов) на два непересекающихся подмножества $\mathrm{E} = \mathrm{E}_N \cup \mathrm{E}_P$, $\mathrm{E}_N \cap \mathrm{E}_P = \varnothing$, где E_N – множество ЭЭГ, включающее только «здоровых» испытуемых, E_P – множество ЭЭГ, содержащее только «пациентов», причем

$$\mathrm{E}_N \ni \left\{ \{\mathbf{s}_k^{(m)}\}_{k=1}^K : m \in \mathrm{M}_N \right\}, \; |\,\mathrm{E}_N\,| = 39,$$

$$\mathrm{E}_P \ni \left\{ \{\mathbf{s}_k^{(m)}\}_{k=1}^K : m \in \mathrm{M}_P \right\}, \; |\,\mathrm{E}_P\,| = 45.$$

Каждая ЭЭГ центрировалась и нормировалась по L_1-норме ($i, j = \overline{1,16}$):

$$\mathbf{A}^{(m)} \left(\mathbf{s}^{(m)} - \mathrm{M}[\mathbf{s}^{(m)}] \right) \to \mathbf{s}^{(m)},$$

$$A_{ii}^{(m)} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \left| s_{k,i}^{(m)} - \mathrm{M}\left[s_{k,i}^{(m)} \right] \right|, \; A_{i \neq j}^{(m)} = 0,$$

где i, j – номер канала (отведения) ЭЭГ. Отметим, что подобная покомпонентная нормировка ЭЭГ удаляет вольтажную разницу между ее каналами (отведениями), оставляя только различие временной структуры каналов.

Далее по приведенному в работах [11, 13] алгоритму рассчитывались величины $\delta_{ji}^{\circ(m)}$ – интегральный коэффициент синхронности (симметричности) между двумя отведениями $i \neq j$ (полный попарный перебор 16 каналов). При этом $\delta_{ji}^{f} = 1$ – отведения i, j абсолютно идентичны; $\delta_{ji}^{\alpha} = 1$– отведения идентичны по скоростям; $\delta_{ji}^{\phi} = 1$– отведения идентичны по кривизне.

Затем внутри каждого из классов N (множество E_N) и P (множество E_P) величины $\delta_{ji}^{\circ(m)}$ усреднялись:

$$\delta_{ji}^{\circ}|_N = \underset{m \in \mathrm{M}_N}{\mathrm{M}} \left[\delta_{ji}^{\circ(m)} \right], \; \delta_{ji}^{\circ}|_P = \underset{m \in \mathrm{M}_P}{\mathrm{M}} \left[\delta_{ji}^{\circ(m)} \right].$$

Далее между усредненными значениями $\delta_{ji}^{\circ}|_N$ и $\delta_{ji}^{\circ}|_P$ рассчитывались абсолютная и относительная разницы:

$$\Delta\delta_{ji}^{\circ} = \delta_{ji}^{\circ}|_N - \delta_{ji}^{\circ}|_P, \; \Delta^{*}\delta_{ji}^{\circ} = \frac{\Delta\delta_{ji}^{\circ}}{\delta_{ji}^{\circ}|_N} \cdot 100\,\%.$$

Наконец, между $\delta_{ji}^{\circ}|_N$ и $\delta_{ji}^{\circ}|_P$ проверялась гипотеза сдвига и отбирались такие отведения j и i, которые с достоверностью α = 0,999 эту гипотезу нарушали. Гипотеза проверялась при помощи критерия Манна – Уитни, принимая во внимание $|\,\mathrm{E}_N\,| = 39$ и $|\,\mathrm{E}_P\,| = 45$ применялась нормальная аппроксимация статистики Вилкоксона [18].

Дополнительно внутри классов N и P выделялись кластеры пар отведений, имеющие соответственно высокие и низкие значения межпарной синхронности (симметричности). Для ограничения размера кластеров (с высоким и низким значением индекса синхронности) проверялась гипотеза сдвига между исследуемой парой отведений и парой, имеющей значения соответственно $\max \delta_{ji}^{\circ}|_{\circ}$ и $\min \delta_{ji}^{\circ}|_{\circ}$. Отбирались такие пары отведений j и i, которые с достоверностью α = 0,999 эту гипотезу не нарушали. Гипотеза проверялась при помощи критерия Манна – Уитни, применялась нормальная аппроксимация статистики Вилкоксона.

На рисунке 1 выделены пары отведений, нарушающие гипотезу сдвига между классами N и P. При этом красным цветом (линии внутри овалов) обозначены такие отведения j и i, в которых $\Delta\delta_{ji}^{\circ} > 0$.

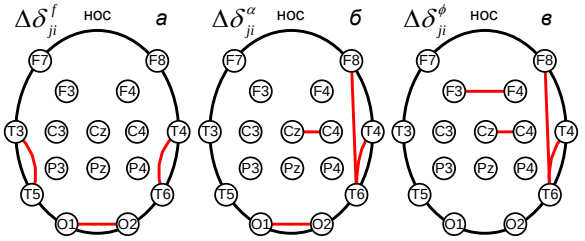


Рис. 1. Пары отведений, нарушающие гипотезу сдвига между классами N и P

На рисунке 2 приведены диаграммы, иллюстрирующие значения $\delta_{ji}^{\circ}|_N$ и $\delta_{ji}^{\circ}|_P$ для пар отведений, нарушающих гипотезу сдвига между классами N и P.

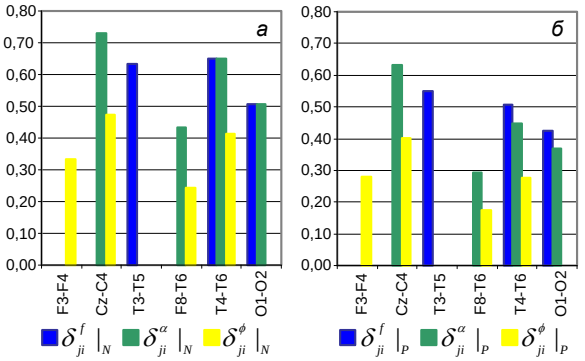


Рис. 2. Значения $\delta_{ji}^{\circ}|_N$ и $\delta_{ji}^{\circ}|_P$ в отобранных парах отведений для классов N (*а*) и P (*б*)

Из сопоставления рисунка 2 с данными таблицы (численные значения параметров синхронности пар отведений в классах N и P) видно, что все пары отведений, нарушающих гипотезу сдвига между классами N и P, имеют значения синхронности выше среднего и близкие к максимальным (внутри класса N).

Хар-ка	$\delta_{ji}^{f}\|_{\circ}$		$\delta_{ji}^{\alpha}\|_{\circ}$		$\delta_{ji}^{\phi}\|_{\circ}$	
	N	P	N	P	N	P
max	0,728	0,730	0,698	0,669	0,474	0,436
M[◦]	0,390	0,382	0,354	0,325	0,206	0,193
min	0,089	0,089	0,086	0,062	0,045	0,049

Заметим, что по данным таблицы величины min и max различаются более чем в 8 раз.

Значения абсолютной $\Delta\delta^{\circ}_{ji}$ и относительной $\Delta^{*}\delta^{\circ}_{ji}$ разницы приведены на диаграммах, изображенных на рисунке 3.

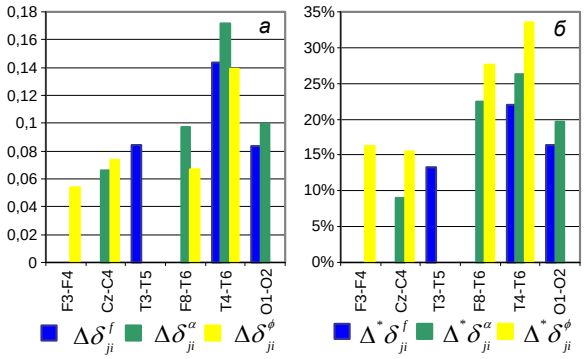


Рис. 3. Значения абсолютной $\Delta\delta^{\circ}_{ji}$ (*а*) и относительной разницы $\Delta^{*}\delta^{\circ}_{ji}$ (*б*) в отобранных парах отведений

Из данных рисунка 3 следует, что синхронность между отобранными отведениями в классе N строго выше, чем в классе P, что в общем-то подтверждает гипотезу К. Фристона о дезинтеграции нейронных сетей при шизофрении [4].

Отметим, что все отобранные пары, за исключением T3–T5 – это либо целиком правое полушарие, либо соединение с правым полушарием (см. рис. 1). При этом уровень синхронности $\delta^{f}_{ji}|_{N}$ для пар отведений T3–T5 и T4–T6 приблизительно одинаков (см. рис. 2), но в классе P уровень синхронности для пары T3–T5 ниже на 13,3 %, а для пары T4–T6 на 22 % (см. рис. 3, *б*). Из чего возможно сделать предположение, что связи в правом полушарии деградируют сильнее.

Пара отведений T4–T6 единственная, которая статистически значимо показывает различие между классами N и P по всем трем составляющим f, α, φ_0. Причем понижение синхронизации в классе P относительно класса N максимально среди всех отобранных пар отведений по составляющей φ_0 – 33,5 %.

Среди отобранных отведений (нарушающих гипотезу сдвига между классами N и P) максимальное значение синхронизма имеет пара Cz–C4 по составляющей α (скорость изменения потенциала отведения), и при этом она имеет наименьшее падение синхронизма в классе P – всего 9 %. Тем не менее оно статистически значимо.

Пара отведений F8–T6, также как и T4–T6, принадлежит правому полушарию. По этой паре классы N и P различаются синхронностью составляющих α и φ_0. Причем понижение синхронизации в классе P относительно класса N уступает только паре T4–T6, так по составляющей φ_0 оно составляет 27,6 %.

Пара отведений F3–F4 «различает» классы N и P только по составляющей φ_0 (кривизна траектории).

На рисунках 1 и 2 (см. [19]), для классов N и P соответственно приведены пары отведений, принадлежащие кластерам $\max\delta^{\circ}_{ji}|_{\circ}$ (красный цвет) и $\min\delta^{\circ}_{ji}|_{\circ}$ (синий цвет). Пунктирными линиями обозначены пары, которые по значениям лежат внутри «своих» кластеров, но статистическая проверка показывает для этих пар нарушение гипотезы сдвига. Отметим, что размер кластеров $\max\delta^{\circ}_{ji}|_{\circ}$ существенно меньше $\min\delta^{\circ}_{ji}|_{\circ}$.

Анализ рисунка 1 (см. [19]) показывает, что в общем случае значения параметра $\delta^{\circ}_{ji}|_{N}$ вполне логичны и ожидаемы. Максимальное значение синхронности, как правило, имеют ближайшие отведения центральной (срединной области), а минимальное – самые дальние, соединяющие лобные и теменные отведения левого и правого полушарий соответственно. При этом кластер $\min\delta^{\circ}_{ji}|_{N}$ (в классе N) строго билатерально симметричен, в отличие от кластера $\max\delta^{\circ}_{ji}|_{N}$. В нем присутствует пара F7–T3, которая проявляется во всех трех составляющих f, α, φ_0, и пары T4–T6 и P4–O2, проявляющиеся в составляющих α (скорость), φ_0 (кривизна).

Необходимо также отметить, что набор пар, принадлежащих кластеру $\min\delta^{\circ}_{ji}|_{N}$, в классе N одинаков для составляющих α и φ_0, но при этом у составляющей φ_0 есть одна особенность. Пара T3–T4 (обозначена синей пунктирной линией на рисунке 1, *с* (см. [19]) по величине $\delta^{\varphi}_{ji}|_{N}$ лежит внутри кластера $\min\delta^{\varphi}_{ji}|_{N}$, но статистическая проверка показывает для нее нарушение гипотезы сдвига.

В свою очередь, анализ рисунка 2 (см. [19]) для класса P демонстрирует более сложную структуру кластеров $\min\delta^{\circ}_{ji}|_{N}$ и $\max\delta^{\circ}_{ji}|_{P}$ относительно им подобных для класса N. Так, в кластере $\min\delta^{\varphi}_{ji}|_{P}$, в отличии от $\min\delta^{\varphi}_{ji}|_{N}$ – билатеральная симметричность отсутствует вовсе. Пары отведений F8–O2 (см. рисунок 2a [19]) и Pz–P4 (см. рисунок 2b [19]) лежат внутри соответствующих кластеров $\min\delta^{\circ}_{ji}|_{P}$ и $\max\delta^{\circ}_{ji}|_{P}$, но статистическая проверка показывает для этих пар нарушение гипотезы сдвига. При этом кластер $\max\delta^{\circ}_{ji}|_{P}$ практически билатерально симметричен (за исключением пары P4–O2).

Таким образом, совместный анализ рисунков [19, рис. 1] (класс N) и [19, рис. 2] (класс P) позволяет выдвинуть гипотезу о наличии неких компенсаторных явлений в классе P.

Заключение

В настоящем докладе продемонстрирован новый подход к исследованию ЭЭГ с позиций анализа степени симметричности многомерных динамических процессов в расширенном пространстве состояний относительно парных перестановок их компонент. Причем анализ проводится не только для самого процесса, но и для его структурных составляющих (скорость и динамическая кривизна) [12]. При этом степень симметричности также характеризует и уровень синхронности.

Применение данного подхода к исследованию ЭЭГ здоровых людей и больных шизофренией позволило получить количественные оценки и построить топографическую карту нарушений межканальной синхронности нейронной активности в различных отделах головного мозга при этом заболевании.

В числе основных полученных результатов:

1. Подтверждена гипотеза К. Фристона о дезинтеграции нейронных сетей при шизофрении [4].
2. Найдены свидетельства того, что при шизофрении связи (в аспекте их синхронности) в правом полушарии деградируют сильнее.
3. Сформулировано предположение, что при шизофрении проявляются синхронизационные компенсаторные явления (с учетом гипотезы о «деструкции синхронизма в правом полушарии»).
4. Анализ синхронности (симметричности) отведений ЭЭГ необходимо проводить не только по уровню сигнала, но и по его структурным составляющим (скорость и динамическая кривизна) [12].

Необходимо отметить, что, исходя из вида нормы синхронности δ°_{ji} [13], зарегистрированное снижение уровня синхронизации между парами отведений, возможно, реализуется двумя путями:

а) Перемежающееся поведение – когда временные интервалы высокой синхронности сменяются интервалами несинхронного поведения. В этом случае при усреднении по периоду времени также отмечается снижение уровня синхронизации.

б) Общая десинхронизация – в этом случае уровень синхронизации снижается примерно одинаково на всем периоде времени.

Выявить, какой из этих путей присутствует в реальности, возможно будет после проведения дополнительных исследований. Этот момент связан с анализом нестационарных характеристик ЭЭГ в аспекте перехода между метастабильными функциональными микросостояниями мозга.

Таким образом, измерение степени межканальной симметричности ЭЭГ является новым инструментом исследования интегративных процессов в головном мозге, который может оказаться весьма информативным, в дополнение к уже существующим подходам и методам.

Автор благодарит проф. А.Я. Каплана за предоставленные исходные данные, а также за дискуссии и замечания, позволившие улучшить представление изложенного материала.

Литература

1. Schizophrenia // Concise Medical Dictionary. Oxford University Press, 2010.
2. *Benes F.M.* Emerging principles of altered neural circuitry in schizophrenia // Brain Res. Rev. 2000. V. 31. P. 251.
3. *Lewis D.A., Gonzalez-Burgos G.* Intrinsic excitatory connections in the prefrontal cortex and the pathophysiology of schizophrenia // Brain Res. Bull. 2000. V. 52. P. 309.
4. *Friston K.J.* Theoretical neurobiology and schizophrenia // Brain Med. Bull. 1996. V. 52 (3). P. 644.
5. *Tauscher J., Fischer P., Neumeister A. et al.* Low frontal electroencephalographic coherence in neuroleptic – free schizophrenic patients // Biol. Psychiatry. 1998. V. 44 (6). P. 438.
6. *Koukkou M., Lehmann D., Wackermann J., Dvorak I., Henggeler B.* Dimensional complexity of EEG brain mechanisms in untreated schizophrenia // Biol. Psychiatry. 1993. V. 33 (6). P. 397.
7. *Breakspear M., Terry J.R., Friston K.J. et al.* A disturbance of nonlinear interdependence in scalp EEG of subjects with first episode schizophrenia // Neuroimage. 2003. V. 20 (1). P. 466.
8. *Spencer K.M., Nestor P.G., Niznikiewicz M.A. et al.* Abnormal neural synchrony in schizophrenia // J. Neurosci. 2003. V. 23 (19). P. 7407.
9. *Lehmann D., Faber P.L., Galderisi S., Herrmann W.M., Kinoshita T., Koukkou M., Mucci A., Pascual-Marqui R.D., Saito N., Wackermann J. et al.* EEG microstate duration and syntax in acute, medication-naive, first-episode schizophrenia: a multi-center study // Psychiatry Research. 2005. V. 138 (2). P. 141.
10. *Борисов С.В., Каплан А.Я., Горбачевская Н.Л., Козлова И.А.* Анализ структурной синхронности ЭЭГ подростков, страдающих расстройствами шизофренического спектра // Физиология человека. 2005. Т. 31 (3). С. 1–8.
11. *Макаренко А.В.* Анализ перестановочных симметрий динамических процессов в пространстве P_0 // II Международная научная конференция «Моделирование нелинейных процессов и систем» : сборник докладов. М. : МГТУ СТАНКИН, 2011. С. 209–214.
12. *Макаренко А.В.* Выражение структуры динамического процесса во временной области в терминах дифференциальной геометрии // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. № 4. С. 71–86.
13. *Макаренко А.В.* Рекурсивный тангенциально-угловой оператор как анализатор синхронизации хаоса // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 16. С. 86–94.
14. *Эллиот Дж., Добер П.* Симметрия в физике / пер. с англ. М. : Мир, 1983. Т. 1, 2.
15. *Бохер М.* Введение в высшую алгебру. ГТТИ, 1933.
16. *Болтянский В.Г., Виленкин Н.Я.* Симметрия в алгебре. 2-е изд. – М. : МЦНМО, 2002.
17. *Овсянников Л.В.* Групповой анализ дифференциальных уравнений. М. : Наука, 1978.
18. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. М. : Физматлит, 2006.
19. *См. дополнительный материал по адресу:* www.rdcn.ru/data/paper/p65_supmat.pdf.

Как увидеть паттерны в облаке точек: персистентность как кредо экспериментатора

Н.Г. Макаренко

Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург
Институт проблем информатики и управления МОН РК, Алма-Ата, Казахстан
ng-makar@mail.ru

Лекция посвящена введению в методы вычислительной топологии – науки, которая интенсивно развивается в последние годы [1–5].

Если верить Св. Иоанну, то «*в начале было Слово*». Слово, т. е. *logos*, означает еще и интеллект, разум, порядок. Может быть, поэтому мы всегда стремимся упорядочить свои впечатления об окружающем мире, пытаясь обнаружить в нем паттерны – геометрические или временные. Любопытно, что этот термин происходит, по-видимому, от pater или patron – отец или хозяин. Как писал Поп: «*порядок есть первый закон небес*». Хаос нельзя сравнить с другим хаосом, возможно поэтому уже на заре развития астрономии звездное небо было населено персонажами мифов и легенд. Образы заменяли «облако» светящихся точек, и нужная форма получалась «декорированием» некоторого графа, построенного на выбранном звездном кластере, подходящей геометрической формой. Позднее оказалось, что произвол в построении графа существенно ограничен алгоритмом минимального натянутого дерева (EMOD): наше зрение устроено так, что соединяет отдельные близкие точки способом, минимизирующим суммарную длину полученных ребер.

Любопытно, что вариационные принципы вообще имманентны нашему сознанию. Вспомним, например, что Марк Аврелий считал наш мир «*лучшим из миров*», независимо от того, является ли он плодом замысла или порождением случая. Это было первым шагом к вариационным принципам Эйлера, Бернулли и Лагранжа, да и большей части математической физики.

Идея соединения ближайших точек для построения содержательного образа – комплекса – лежит в основе понятия нерва покрытия – одного из основных объектов алгебраической топологии.

Начнем с облака пыли – образа борелева множества. Декорируем каждую точку диском с центром в каждой точке облака. Начнем синхронно увеличивать их радиусы. Два диска, имеющих непустое пересечение, разрешают нам соединить их центры ребром. Пересечение трех дисков эквивалентно возникновению грани – треугольника, соединяющего центры трех точек облака. Динамику этого процесса удобно параметризовать величиной радиуса круга. В процессе роста радиусов будут исчезать отдельные компоненты связности – точки, которые «убиваются» ребрами. Две точки, соединенные ребром, эквивалентны, или гомологичны, – их можно совместить, двигая вдоль ребра. Более точно, гомология – это отличие «на границу». При дальнейшей эволюции покрытия будут возникать петли, или циклы, образованные ребрами. Из них важны дыры – циклы, которые нельзя стянуть в точку, потому что внутри нет грани. Конечно, эти дыры будут «убиваться» возникающими гранями. В целом описанный процесс называют *фильтрацией* облака. При этом «время жизни» точек и дыр измеряют интервалом радиуса диска покрытия – от момента рождения компоненты нерва до ее гибели. Элементы с максимальным временем жизни называют *персистентными*. Процесс построения нерва легко обобщается на пространства большой размерности.

В лекции предполагается рассказать, как описанная процедура может быть эффективно использована для выделения форм из наблюдаемого облака точек. Это одна из важных проблем теории распознавания образов в присутствии шумов.

Будет показана связь персистентности с теорией Морса и редукцией размерности. Построению нерва сопутствуют некоторые интересные метрики, которые позволяют сравнить одно облако точек с другим. Некоторые из этих метрик можно использовать для построения эффективных методов диагностики медицинских изображений [6]. Лекция заканчивается примером топологического анализа природных ландшафтов по цифровым изображениям [7]. Такие данные широко используются, как данные дистанционного зондирования в ГИС-технологиях.

Литература

1. *MacPherson R., Schweinhart B.* Measuring shape with topology //J. Math. Phys. 2012. V. 53. 073516.

2. *Carlsson E., Carlsson G., Silva V. de.* An algebraic topological method for feature identification // International J. Computational Geometry and Applications. 2006. V. 16, № 4. P. 291–314.

3. *Edelsbrunner H., Harer J.* Computational Topology: an introduction. AMS, 2010. 241 p.

4. *Carlsson G.* Topology and data // Bull. Amer. Math. Soc. 2009. V. 46. P. 255–308.

5. *Cohen-Steiner D., Edelsbrunner H., Harer J.*, Stability of persistence diagrams // Discrete Comput. Geom. 2007. V. 37. P. 103–120.

6. *Dabaghian Y., Mémoli F., Frank L., Carlsson G.* A topological paradigm for hippocampal spatial map formation using persistent homology // PLoS Computational Biology. 2012. V. 8(8). e10025815.

7. *Mumford D., Desolneux A.* Pattern Theory. The StocAnalysis of Real-World Signals. A. K. Peters, Ltd., 2010. 407 p.

Особенности динамики фрактальной размерности ЭЭГ при протекании эмоциональных процессов, относящихся к различным уровням психической иерархии у больных шизофренией, совершивших социально опасные поступки

А.А. Меклер[1], И.А. Горбунов[2], С.Ю. Болотова[2]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
[2]Санкт-Петербургский государственный университет
mekler@yandex.ru

Согласно теории Л.М. Веккера, психические явления можно соотносить с различными уровнями иерархии психики. Эти уровни можно различать по содержанию в них более или менее сложных элементов опыта. В частности, более сложные уровни включают в себя опыт, связанный с социальными отношениями, этическими нормами, восприятием комического. Такие особенности можно выявить и в эмоциональных процессах, так как они могут в себя включать опыт, имеющий как социальный или этический характер (высшие уровни), так и витальный (низшие уровни).

В прошлых работах [1, 2, 3, 4] мы показали, что фрактальная размерность сигнала ЭЭГ связана с положением в иерархии психики эмоций, возникающих при просмотре видеороликов эмоциогенного содержания.

При этом выяснилось, что фрактальная размерность ЭЭГ принимает более высокие значения при просмотре группы видеороликов, которые были классифицированы экспертами, как более сложные, а также при просмотре видеороликов положительного эмоционального содержания.

Однако сложность и иерархический уровень эмоционального процесса зависят не только от внешних (средовых) характеристик опыта, но и от глубины переживания его человеком. Иными словами, одни и те же события будут затрагивать разные уровни психической организации людей, обладающих различным интеллектуальным уровнем, личностными особенностями, страдающими психическими заболеваниями. В связи с этим возникает вопрос, можно ли оценить положение протекающего эмоционального процесса в иерархии не только по характеристикам стимула, но и по сложности их переработки в психике.

Таким образом, была выдвинута гипотеза: фрактальная размерность ЭЭГ при переживании эмоции отражает иерархические свойства переживаемых эмоций, которые искажаются у больных шизофренией, совершивших социально опасные поступки.

В нашем эксперименте участвовало 11 испытуемых, больных шизофренией, совершивших социально опасные деяния и находящихся на принудительном лечении, в возрасте от 23 до 38 лет (экспериментальная группа) и 11 условно здоровых испытуемых в возрасте от 21 до 40 лет (контрольная группа).

Испытуемым в обеих группах было предъявлено 27 видеороликов, стимулирующих положительные и отрицательные эмоции, относящиеся к двум уровням психической иерархии. В результате из всех роликов были сформированы 5 групп (Меклер, Горбунов, 2010):

1) видеоролики нейтрального эмоциогенного содержания;

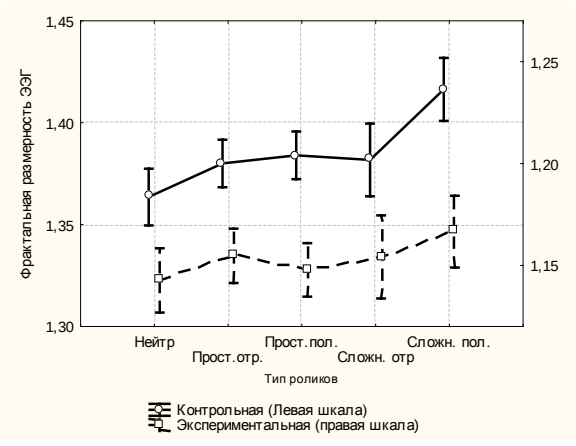
2) видеоролики, стимулирующие отрицательные эмоции низких уровней психической иерархии;

3) видеоролики, стимулирующие положительные эмоции низких уровней психической иерархии;

4) видеоролики, стимулирующие отрицательные эмоции высоких уровней психической иерархии;

5) видеоролики, стимулирующие положительные эмоции высоких уровней психической иерархии.

В процессе просмотра видеороликов у испытуемых регистрировалась ЭЭГ. Предполагалось, что эмоции, стимулируемые видеороликом, наиболее интенсивно и характерно протекают именно в конце видеоряда. Поэтому для оценки фрактальной размерности из ЭЭГ выделялись отрезки, начинающиеся за 10 секунд до конца ролика и заканчивающиеся в конце его просмотра. Фрактальная размерность оценивалась при помощи алгоритма Хигучи [5]. На рисунке представлены значения фрактальной размерности ЭЭГ, зарегистрированной в указанных состояниях, усредненные по всем отведениям и испытуемым в каждой группе.



Сравнение изменений фрактальной размерности ЭЭГ при просмотре видеороликов 5 типов эмоциогенного содержания в экспериментальной и контрольной группах

Верхний график отражает изменения в контрольной группе при переходе из одного состояния в другое, а нижний – в экспериментальной. Основные наблюдаемые различия между группами – в общем уровне фрактальной размерности при просмотре роликов. Как видно, график для испытуемых из контрольной группы варьирует от 1,3 до 1,45 (левая шкала), а график для испытуемых экспериментальной группы варьирует от 1,10 до 1,25. В контрольной группе наблюдается тенденция к большей разнице между роликами, продуцирующими сложные положительные эмоции, и всеми остальными типами эмоций.

Статистический анализ достоверности различий (post-hoc-критерий с поправкой Бонферрони, одной из наиболее консервативных) показал, что величина фрактальной размерности ЭЭГ, усредненная по всем отведениям, достоверно различается в контрольной группе при переживании простых и сложных положительных эмоций (во втором случае она больше, $p < 0{,}009$). В экспериментальной группе этих различий не наблюдается ($p < 0{,}56$). Также в контрольной группе имеются достоверные различия между величиной фрактальной размерности ЭЭГ, зарегистрированной при переживании сложных отрицательных и сложных положительных эмоций (во втором случае она больше, $p < 0{,}04$). В экспериментальной группе достоверных различий также не наблюдается ($p = 1{,}0$).

Также в контрольной группе наблюдается излом графика при переходе от простых отрицательных к простым положительным эмоциям. В экспериментальной группе такого перелома не наблюдается. Таким образом, можно предположить, что у больных шизофренией, совершивших социально опасное деяние, при просмотре роликов, продуцирующих простые отрицательные эмоции, фрактальная размерность повышается по отношению к переживанию простых положительных эмоций. Следовательно, для них простые отрицательные эмоции (витальные) переживаются на более сложном уровне, чем простые положительные. У условно здоровых людей такой тенденции не наблюдается. Также особенно хорошо видны различия по сложным положительным эмоциям, фрактальная размерность при протекании которых в контрольной группе значительно повышается относительно других эмоциональных процессов, что может свидетельствовать о более сложном переживании, отражающем более высокий уровень психической иерархии.

Выводы

Фрактальная размерность ЭЭГ отражает сложность субъективного переживания, зависящую от его положение в иерархии психических явлений (Л.М. Веккер).

У больных шизофренией, совершивших социально опасные поступки, наблюдается связь нарушений эмоционально-нравственной сферы с искажением иерархической организации психических процессов, что отражается в специфике изменений фрактальной размерности ЭЭГ при изменении характера переживаемых эмоций.

Литература

1. *Горбунов И.А., Меклер А.А.* Использование критерия автоинформативности для изучения физиологических механизмов эмоций в психофизиологическом эксперименте // Материалы 4-й международной конференции по когнитивной науке 22–26 июня 2010. Томск : Томский гос. университет, 2010. Т. 1. С. 223–225.

2. *Меклер А.А., Горбунов И.А.* Физиологические особенности протекания эмоциональных процессов, относящихся к различным уровням иерархии психики // Материалы седьмого Международного междисциплинарного конгресса «Нейронаука для медицины и психологии», 3–13 июня 2011 года. Судак, Крым, Украина, 2011. С. 288–289.

3. *Mekler A., Gorbunov I.* The Psychophysiological Study of Emotions Related To Different Psychic Levels // European Perspectives on Cognitive Science : Proceedings of the European Conference on Cognitive Science, 2011. Bulgaria, Sofia : New Bulgarian University Press, 2011.

4. *Меклер А.А., Горбунов И.А.* Связь характера переживаемых эмоций с характеристиками сложности ЭЭГ // Пятая международная конференция по когнитивной науке : тезисы докладов, 18–24 июня 2012 г. Калининград, 2012. С. 524–525.

5. *Higuchi T.* Approach to irregular time series on the basis of the fractal theory // Physica D. 1988. V. 31. P. 277–283.

Структура и динамика этанол-зависимой функциональной системы на ранних этапах становления ремиссии алкогольной зависимости в виде двудольной нейронной сети

Ю.В. Никонов

ФГБУЗ МСЧ № 59 ФМБА России, Пенза
nikyuv@yandex.ru

Введение

Рассматривается возможность моделирования некоторых свойств нейронных сетей головного мозга в процессе становления ремиссии алкогольной зависимости (АЗ) с помощью формализма двудольных (ДД) сетей. ДД-сети – сложные сети, состоящих из двух долей – частей (англ. bipartite) [8, 10]. Узлы внутри каждой части такой сети между собой не взаимодействуют. Так как для осуществления функций центральной нервной системы часто требуются сложные механизмы межполушарного взаимодействия, то «узлам» модели могут соответствовать достаточно сложные структуры головного мозга. В ДД-сетях возможно подключение двух узлов одного типа, одной «части» сети к одному узлу иного типа, другой «части». Этому может соответствовать, например, локализация двух узлов в одном подмножестве нейронов нейронной сети и одного узла, с которым и происходит взаимодействие, – в другом подмножестве. Нейросеть может быть представлена как граф с конечным множеством вершин-узлов, соединенных ребрами, которые отражают взаимодействие узлов между собой. Нейронные сети относятся к сложным сетям, которые могут рассматриваться и как ДД-сети, и как сети «одночастичные – однодольные».

Установлено (Дмитрий Крюков, Максим Кицак, Калифорнийский университет в Сан-Диего, США), что изучение ДД-сетей с помощью инструментов, разработанных для «обычных» сетей (например, модель «S_1»), может приводить к существенной потери информации. Исходя из этого, исследователи разработали новый инструмент – S_1S_1-модель, успешно примененную к исследованию сети Интернета и метаболических сетей кишечной палочки и человека [8, 10]. Необходимо учитывать, что нейронные сети головного мозга в процессе становления ремиссии АЗ относятся к временным – изменяющимся во времени сложным сетям [7]. В работе [9] показано, что, при определенных условиях свойства равновесных и неравновесных, временных, сетей можно считать эквивалентными. В частности, если вероятность связи между парой узлов идентична, не так важно, используются ли в модели статичные графы или графы динамичные, временные.

Взаимодействующие нейронные сети, определяющие динамику становления ремиссии АЗ, рассматривают как изменяющуюся патологическую этанол-зависимую функциональную систему (ЭЗФС) [6]. В контексте свойств S_1S_1-модели можно предположить, что в процессе развития ремиссии АЗ формируется состоящая из двух подсистем ДД-нейросеть с соответствующими свойствами (ДД-сеть включает в себя «алкогольную» подсистему «а» и подсистему ремиссии «р») [2, 3, 6, 8, 10]. Чередование в процессе начальных этапов становления ремиссии АЗ доминирования «алкогольной» нейросети «а» и нейросети «р» (сети ремиссии) – пример ДД-сети, с нередкими для ДД-сетей взаимодействием двух подсистем-нейросетей в соответствии с моделью «хищник – жертва». В нашем случае модель «хищник – жертва» с логистической поправкой (затухающими колебаниями) [4]. М.Ф. Тимофеевым [6] были опубликованы результаты исследования больных АЗ (с диагнозом хронического алкоголизма II стадии) мужчин с помощью реоэнцефалографической (РЭГ) методики изучения реакции сосудов лобной области головного мозга (определялся коэффициент межполушарной асимметрии, отражающий состояние активности нейронных сетей – $К'_{ас}$) на запах алкоголя. Контрольная и основная группа были обследованы методами РЭГ и самоотчета. Запах алкоголя подавали в течение 20 секунд. Показатели асимметрии кровоснабжения полушарий головного мозга во время проведения функциональной пробы с парами алкоголя ($К_{ас}$ – отношение $К'_{ас}$, определенного после проведения функциональной пробы к фоновому значению $К'_{ас}$) отражают состояние активности нейронных сетей головного мозга человека. Методика может объективировать неосознаваемое отношение к приему алкоголя в момент исследования. Целью этой работы было экспериментальное определение периодов риска рецидива алкоголизма на ранних этапах ремиссии. Периоды максимальной чувствительности к запаху этанола – нечетные (они же «периоды риска» рецидива алкоголизма) – приходятся на исходный день (нулевой день воздержания от алкоголя) (I период), 2–3-й дни (III период), 7–8-й дни (V период), 19–21-й дни (VII период) и 45–50-й дни (IX период). $К_{ас}$ нечетных периодов соответственно: 253, 120, 95, 79 и 80 %. Периоды минимальной чувствительности к запаху алкоголя – четные, приходятся на 2-й день (II период), 4–5-й дни (IV период), 12–13-й дни (VI период), 30–32-й дни (VIII период) и 62–66-й дни (X период) ремиссии. $К_{ас}$ четных периодов соответственно: 95, 65, 50, 39 и 37 %. Обращает на себя внимание, что сроки смены (в днях) I–VII периодов становления ремиссии точно соответствуют ряду чисел Фибоначчи [1]:

1; 2; 3; 5; 8; 13; 21; 32; 50; 66…

(сроки смены периодов становления ремиссии в сутках).

1; 2; 3; 5; 8; 13; 21; 34; 55; 89…

(ряд Фибоначчи).

I; II; III; IV; V; VI; VII; VIII; IX; X (номер периода по М.Ф. Тимофееву).

Длительность VIII периода (32 суток против 34 в ряду Фибоначчи) – начало нарастающего отличия (IX период: 50 суток против 55, X период: 66 суток против 89 в ряду Фибоначчи) от закономерностей I–VII периодов, что, вероятно, свидетельствует о смене свойств ЭЗФС.

Числовые ряды $К_{ас}$ нечетных периодов по Тимофееву отражают состояние «алкогольной» нейросети «а», они соответствуют актуализации патологического влечения к алкоголю (ПВА) и повышенному риску срыва ремиссии АЗ. Числовые ряды $К_{ас}$ четных периодов соответствуют отсутствию ПВА и относительно устойчивому состоянию подсистемы становления ремиссии алкоголизма – нейросети «р». Легко видеть, что значения числовых рядов $К_{ас}$ нечетных и четных периодов можно аппроксимировать как ряды $Ф^n$, где Ф = 1/1,62 = 0,62 (золотое сечение), а n = ±(5/2; 2; 3/2; 1; 1/2; 0). Причем в эмпирически полученных данных, опубликованных Тимофее-вым, «пропущены» значения $Ф^{-3/2}$, $Ф^{-1}$; нет зна-чений $К_{ас}$, равных $Ф^{-5/2}$ и $Ф^{5/2}$. Анализ числовых данных показывает, что колебания значений $К_{ас}$ определяют значения периодов (с первого по седьмой) становления ремиссии алкоголизма: $T_{I\text{-}VII}$ по формуле [2, 3, 4]:

$$T_{I\text{-}VII} = 2\pi/(w_i \cdot w_j)^{1/2}, \qquad (1)$$

где w_i и w_j, – соответственно значения $(К_{ас})^2$ периодов I и II, III и IV, V и VI, VII и VIII, а $w_k = (w_i \cdot w_j)^{1/2}$. w_k – среднегеометрическая частот w_i и w_j. Частоты w_k, соответствующие периодам становления ремиссии алкоголизма по Тимофееву (VII, VI, V), в порядке возрастания равны 0,31; 0,48; 0,78… Значения $(К_{ас})^2$ являются в то же время частотами колебаний, выраженными в виде единиц частоты: сутки$^{-1}$. То есть имеется ряд частот, отражающих асимметрию кровоснабжения полушарий головного мозга, а значит, и асимметрию активности соответствующих нейронных сетей, во время проведения функциональных проб с запахом алкоголя. Периоды минимальной чувствительности к запаху алкоголя (II, IV, VI, VIII, X периоды) соответствуют относительно устойчивым состояниям ЭЗФС. Периоды максимальной чувствительности к запаху этанола (I, III, V, VII, IX периоды – они же «периоды риска» рецидива алкоголизма) – состоянию неустойчивости ЭЗФС. Вероятно, процесс становления ремиссии алкоголизма как динамики ЭЗФС можно отнести к ряду биологических процессов развития самоорганизующихся систем – нейронных сетей.

В установленных Тимофеевым значениях динамики $К_{ас}$ легко видеть наличие структуры из 4 двойных позиций:

2,53 … 1,20 0,95 0,79 … сут$^{-1}$.
0,95… 0,65 0,50 0,39 … сут$^{-1}$.
I II III IV V VI VII VIII … №

Концепция авторов [8, 10] о скрытых переменных ДД-сетей основана на формализме, развитом ранее для «обычных» сложных сетей (в том числе для нейросетей головного мозга), причем узлы обоих типов ДД-сети они рассматривают как находящиеся в скрытом метрическом пространстве. Каждый узел каждого типа в ДД-сети имеет ряд скрытых переменных. Расстояние между двумя узлами в этом пространстве определяется вероятностью их связи (учитывая временную природу ДД-нейросети ЭЗФС, возможно измерение этого расстояния в интервалах времени). Например, если два узла одного типа имеют по крайней мере один общий связанный узел другого типа, то можно вычислить вероятность их связи. Если два узла не имеют связи, то эта вероятность равна нулю. Можно вычислить вероятность того, что два узла одного рода со скрытыми переменными имеют общих соседей в узлах другого типа [8, 10]. Существенно, что S_1 и S_1S_1-модели, как и реальные сложные сети, имеют свойство самоподобия, т. е. при изменении масштаба, шкалы рассмотрения, корреляционная структура этих сетей остается неизменной. Иначе, чем для сети «обычной», «однодольной» в ДД-сети вычисляется коэффициент кластеризации (так как соседние узлы в такой сети никогда не взаимодействуют). Узлы в реальных ДД-сетях, как правило, более сильно кластеризованы по сравнению с сетями с рандомизированными узлами [8, 10].

S_1 и S_1S_1-модели основаны на использовании представления ДД-сети в виде 1-D евклидового пространства (окружности) [8, 10] с полярными координатами. Причем N_a (верхние узлы алкогольной подсистемы) и $N_р$ (нижние узлы, подсистемы ремиссии) равномерно распределены по окружности радиуса R.

N – общее количество узлов модели. Плотность узлов подсистем «а» и «р» определяется формулами

$$\sigma_a = N_a/2\pi R, \qquad (2)$$

и

$$\sigma_р = N_р/2\pi R. \qquad (3)$$

Каждому узлу N_a и $N_р$ присваивается скрытая переменная, соответственно k_a и $k_р$, чему соответствует плотность вероятности, соответственно $p_a(k_a)$ и $p_р(k_р)$.

В нашем случае (в S_1-модели) длина окружности модели ($C = 2\pi R$, $T = T_{I\text{-}VII}$ (1) при $R = 1$) $C = T' = 2\pi$. Примем, что $T' = 2\pi$ [6]. Легко видеть, что $w_k = w_0 n$, где $n = 1, 2, 3…$

Одна из версий модели с $T' = 2\pi$ – с равномерным распределением узлов с конечным количеством возрастных страт – возрастов узлов N, где N – общее количество узлов модели. Эта версия модели была создана для моделирования социальных сетей, предполагалось, что люди одного возраста чаще, с большей вероятностью будут вступать между собой в контакт [8, 10]. «Возраст» узлов, который растет в динамике ЭЗФС параллельно с уменьшением количества узлов, определяют параметры w_i и w_j.

В ДД-представлении сети плотности узлов N_a и $N_р$ определяются соответственно формулами (2) и (3).

Пример:

Пусть $N_a = 2$, а $N_р = 1$. Тогда $\sigma_a = 0{,}32$, а $\sigma_р = 0{,}16$.

В S_1-модели $\sigma = N/2\pi$. Пусть $N = 3$, тогда $\sigma = 0{,}48$ (сумма $\sigma_a = 0{,}32$ и $\sigma_р = 0{,}16$).

То есть $\sigma = \sigma_a + \sigma_р$, и соответственно $T = T_a + T_р$, здесь T – интервалы времени, метрика.

$\sigma = N/2\pi$, где N – количество узлов сети на окружности $S_1 = T' = 2\pi$.

N (число узлов):

...8 5 3 2

w_k (частота):

… 1,27 0,80 0,48 0,32

T (расчетное)

… (4,94) (7,85) (13,08) (19,63)

T (эмпирически установленное, в сутках)

… 5 8 13 21

номер периодов по Тимофееву

… IV V VI VII

Легко видеть, что в процессе становления ремиссии АЗ происходит уменьшение числа узлов системы N и нарастание значений «возраста» узлов T (в сутках). Здесь значения T имеют смысл: а) «возраста» «стареющей», теряющей узлы нейронной сети ЭЗФС, б) «расстояния», в единицах времени от узла до начала координат. Важно, что возможная интерпретация этого – инактивация узлов модели, происходит в следующем порядке: от более «молодых», т. е. образовавшихся или активированных наиболее поздно, к более «старым», т. е. образовавшихся или активированных раньше. Другое представление этой системы – модель «хищник – жертва» с логистической поправкой, описывающей затухающие колебания численного состава взаимодействующих популяций при убывании ресурса, – может служить объяснением гипотетического уменьшения количества узлов ЭЗФС. Предположительно верхние (алкогольные) узлы играют роль «хищников»: в условиях отсутствия этанола они поглощают нижние узлы (узлы ремиссии) и «гибнут» сами. Существенно, что в динамике рассматриваемой S_1-модели нейронной сети количество ее узлов (узлов «а» – алкогольных и узлов «р» – ремиссии) уменьшается следующим образом: (4 «а» + 4 «р») → (3 «а» + 2 «р») → (2 «а» + 1 «р»)→ → (1 «а» + 1 «р») …, т. е. согласно убывающему ряду Фибоначчи. Всего на временном интервале в 21 день – 8 узлов ДД-сети в данных, полученных эмпирически (4 узла «а» и 4 узла «р»).

В модели каждому узлу-вершине (в S_1S_1-модели) N_a (из нечетных периодов по Тимофееву) с определенным возрастом T соответствует определенный узел-вершина N_p из четных периодов по Тимофееву с разницей в «возрасте» в 3 шага-этапа нисходящей геометрической прогрессии со знаменателем, близким к 0,78 [2]. Рассматривая структуру сетей становления ремиссии АЗ как ДД-сеть, мы получаем для V–VII периодов по Тимофееву значения времени в сутках, рассчитанные по формуле (1). В результате прекращения поступления необходимого для функционирования ЭЗФС этанола образующие ее нейронные сети, вероятно, постепенно инактивируются, самоорганизуются, чему и соответствует уменьшение количества узлов модели. Узлы двух подсистем-нейросетей «а» и «р» составляют одно целое, одну систему-нейросеть (ЭЗФС), но имеют разные свойства (по параметру реакции кровоснабжающих эти узлы-нейросети сосудов головного мозга на запах алкоголя) и взаимодействуют друг с другом, что может служить основой для появления закономерностей золотого сечения и ряда Фибоначчи в случае оптимального режима становления ремиссии [1, 2, 4].

Узлы двух взаимодействующих подсистем ДД сложных сетей делят на узлы «верхние» и «нижние» [8]. Верхние узлы ДД-сети [7] – узлы «а» (нечетные периоды по Тимофееву) и нижние узлы ДД-сети в ЭЗФС [7] (четные периоды) (в диапазоне I – VII) – узлы «р» с разными, в определенном смысле противоположными свойствами. Описано представление ряда Фибоначчи именно с такими свойствами [1]: 1; – 1; 2; – 3; 5; – 8; 13; –21..., где значения нечетных периодов имеют знак «–», что может соответствовать узлам-«хищникам», а четных – знак «+», что может соответствовать узлам-«жертвам».

Выводы

В статье сделана попытка применения концепции скрытой метрики ДД сложных сетей (в виде временных интервалов – «расстояний» между узлами сети), отражающих вероятностную связь между парами узлов модели [8, 10] для моделирования структуры и динамики ЭЗФС, отражающих динамику функциональной межполушарной асимметрии головного мозга, определяемую по данным РЭГ [6]. Применено представление временной структуры ЭЗФС у больных с АЗ на начальных этапах становления ремиссии в виде S_1 и S_1S_1 [8, 10] моделей нейронной сети с убывающим количеством узлов и, соответственно, с ее «старением». Можно констатировать, что концепция скрытых метрических свойств сложных сетей (в том числе ДД-сетей) позволяет выявлять неочевидные геометрические свойства ЭЗФС по М.Ф. Тимофееву [6], дает возможность для более глубокого понимания эмпирически установленных свойств ЭЗФС [6]. S_1S_1-модель структуры ЭЗФС, как модель конечного этапа «старения» сложной сети, может быть применена и для других изменяющихся с течением времени ДД-сетей, в том числе для искусственных нейронных сетей в режиме прогрессирующей инактивации или отключения составляющих их узлов [5]. Сама же прогрессирующая инактивация узлов ЭЗФС может быть понята как результат взаимодействия верхних и нижних узлов ДД-сети по типу «хищник – жертва».

Литература

1. *Балакшин О.Б.* Коды да Винчи – новая роль в естествознании? Неожиданное о золотом сечении : Гармония асимметричных подобий в Природе. М. : Комкнига, 2006. 176 с.

2. *Никонов Ю.В.* О функциональной межполушарной асимметрии головного мозга при алкогольной зависимости // Асимметрия. 2008. Т. 2, № 3. С. 43–48.

3. *Никонов Ю.В.* Алкогольная зависимость в контексте «формулы человека» Лефевра // Рефлексивные процессы и управление. 2008. Т. 8, № 3. С. 105–110.

4. *Никонов Ю.В.* О закономерностях становления ремиссии алкогольной зависимости в контексте модели «хищник – жертва» // Сознание и физическая реальность. 2010. Т. 15, № 2. С. 16–21.

5. *Никонов Ю.В.* О моделировании топологии нейросетей // Материалы XVI Международной конференция по нейрокибернетике (ICNC-12). Ростов-на-Дону, 2012.. Т. 2. С. 134–137.

6. *Тимофеев М.Ф.* Периоды риска у больных алкоголизмом на ранних этапах ремиссии и противорецидивная иглотерапия // Вопр. наркологии. 1992. № 1. С. 35–38.

7. *Holme P., Saramaki J.* Temporal networks. Physics Reports. 2012. V. 519. P. 97–125.

8. *Kitsak M., Krioukov D.* Hidden Variables in Bipartite Networks // Phys. Rev. E. 2011. V. 84. P. 026114.

9. *Krioukov D., Ostilli M.* Duality between equilibrium and nonequilibrium networks // 2013. arXiv: 1302.3530v1.

10. *Serrano M., Boguna M., Sagues F.* Uncovering the hidden geometry behind metabolic networks // Molecular BioSystems. 2012. 8. P. 843–850.

Примеры динамических процессов преобразования сенсорных сигналов в таламо-кортикальных сетях

И.В. Нуйдель, М.Е. Соколов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
nuidel@appl.sci-nnov.ru

Введение

Для понимания процессов обработки информации в живых системах проводится приведённое в работе исследование динамики нейроноподобных систем, которое ориентировано на создание симуляторов процессов в живых системах.

Нами разрабатываются нейроноподобные модели, основанные на данных об архитектуре связей в мозге, с целью выяснить принципы работы его нейронных структур.

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

Модель программно реализована в среде MATLAB 7.7.0.

Схема взаимодействия модулей и описание модели

Функциональные схемы моделируемых систем получены из исследований мозга [1].

В экспериментальных нейрофизиологических исследованиях выявлено, что важные и универсальные процессы обработки информации происходят во взаимосвязанных нейрональных модулях: коре, ретикулярных ядрах таламуса, специфическом таламусе. Поэтому на моделях взаимодействия переменных, соответствующих именно этим отделам мозга, можно выяснять возможные режимы преобразования входных сигналов, а также внутренние процессы, которые могут ограничить или полностью нарушить их функционирование. Варианты таких нарушений проявляются, в частности, в эпилептиформной активности.

Архитектуру настоящей модели определяют взаимодействующие звенья таламо-кортикальной цепи. Структура одного нейронного модуля состоит из ансамблей пирамидальных нейронов, тормозных интернейронов коры (в данной работе их влияние не учитывается), нейронов специфических таламических ядер (специфические ядра, Th) и тормозных нейронов ретикулярного ядра таламуса (неспецифические ядра, nRT), связанных между собой. Схема показана на рис. 1 [1]. Знаками «+» и «–» показаны возбудительные и тормозные связи соответственно. Стрелка в нижней части рисунка – сенсорный вход в таламус.

В модель включены четыре однотипных взаимосвязанных нейронных модуля. В модели нейронные ансамбли коры одного модуля воздействуют на нейронные ансамбли коры других модулей. Состояние модуля описывается четырьмя переменными, определяющими распределение возбуждения в соответствующих нейронных ансамблях.

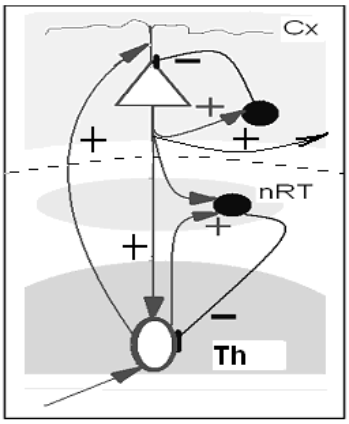


Рис. 1. Взаимосвязи пирамидных нейронов и интернейронов коры (Cx) и ядер таламуса: сенсорного (Th) и ретикулярного (nRT) [1]

На основе работ [2, 3] по моделированию активности в плоском двумерном слое (однослойная однородная распределенная нейроноподобная система, состоящая из однотипных, связанных между собой, активных пороговых элементов, взаимодействующих между собой через возбуждающие и тормозные связи) была построена приведенная здесь система уравнений.

Это балансные интегро-дифференциальные уравнения, написанные для системы с большим количеством однотипных элементов – нейронов в приближении однородности рассматриваемого участка [2, 3].

После усреднения по пространству в точке с координатами $\vec{r} = (x, y)$ находится активный элемент, содержащий большое количество «реальных» нейронов (распределенная модель).

$$\partial U_1^j / \partial t = -\frac{U_1^j}{\tau_1^j} + k_1^j \times$$

$$\times F_1[-T_1^j + k_{ex}^j U_{ex}^j + k_{12}^j U_2^j + k_{14}^j \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{14}^j(\vec{\xi}) U_4^j(\vec{r} - \vec{\xi}, t) d\vec{\xi}],$$

$$\partial U_2^j / \partial t = -\frac{U_2^j}{\tau_2^j} + k_2^j \times$$

$$\times F_2[-T_2^j + k_{21}^j U_1^j - k_{23}^j U_3^j + k_{22}^j \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{22}^j(\vec{\xi}) U_2^j(\vec{r} - \vec{\xi}, t) d\vec{\xi} +$$

$$+ \sum_{i \neq j} \gamma_i^j \int_{-\infty}^{\infty} U_2^i d\vec{r}],$$

$$\partial U_3^j / \partial t = -\frac{U_3^j}{\tau_3^j} + k_3^j \cdot F_3[-T_3^j + k_{32}^j U_2^j],$$

$$\partial U_4^j / \partial t = -\frac{U_4^j}{\tau_4^j} + k_4^j \cdot F_4[-T_4^j + k_{41}^j U_1^j + k_{42}^j U_2^j].$$

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

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

$$\Phi(x,y)=(1-ar^2)\cdot\exp(-b\cdot r^2)$$

– функция пространственной связи,

$$r_x = x\cdot\cos\varphi + y\cdot\sin\varphi,$$

$$r_y = -x\cdot\sin\varphi + y\cdot\cos\varphi.$$

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

Дискретные аналоги уравнений строятся по явной разностной схеме и позволяют вычислить состояние всех переменных $U_i(x,y,t)$ на $(n+1)$-м временном шаге по соответствующему значению функции на n-м шаге. Шаг дискретизации по времени 0,0005.

В нормальных условиях функционирования в системе происходит следующее: в модельную систему приходит внешний сигнал на отделы таламуса модельных модулей, через таламус внешний сигнал поступает в различные ансамбли пирамидальных клеток коры. В работах Шевелева [4] было высказано предположение, что сигнал с таламуса приходит в разные участки коры (отвечающие за выделение разных признаков) со сдвигом фазы, вызванным временной задержкой. Этот сдвиг фазы обуславливает асинхронную работу в клетках коры в процессе обработки информации. Происходит следующее: внешний сигнал активирует специфические (сенсорные, или релейные) ядра таламуса (Th, переменная U_1), по таламокортикальному пути возбуждение поступает на ансамбль пирамид коры (переменная U_2), пирамиды коры связаны с тормозными интернейронами (переменная U_3), сенсорные, или релейные, ядра таламуса (Th, U_1) и кора (U_2) активируют ретикулярные ядра таламуса (nRT). nRT (переменная U_4) оказывает тормозное влияние на релейные ядра таламуса (U_1), сигнал больше не поступает на кору и nRT деактивируется. Затем процесс повторяется. В результате, после прохождения входного сигнала через нейронные ансамбли таламокортикальной системы на нейронных ансамблях коры формируется прерывистое, стробированное представление исходного сигнала [4–8].

Результаты

В работе приведены результаты последних расчетов на функциональной модели взаимодействия нейрональных модулей при обработке информации в таламо-кортикальной системе [5].

В нормальном режиме (при обработке информации) колебания электрической активности в отделах мозга асинхронные и низкоамплитудные (рис. 4).

Возникновение ритмических высокоамплитудных разрядов в результате синхронной работы нескольких нейрональных модулей является основной чертой всех видов эпилепсий [7].

В работе найдены параметры, при которых на коре из исходного тестового изображения (круга) выделяется контур. Изменением времени релаксации переменной U_4 (ретикулярные ядра таламуса) при неизменных остальных параметрах получены разные режимы выделения контура на модели одной колонки (рис. 2). Все параметры системы задаются в относительных единицах. Внешний сигнал подаётся с периодом T_{ef} = 200.

Визуально по результатам расчетов выбраны наилучшие параметры модели для выделения контура (рис. 3, *а*).

Проведены расчеты на четырех колонках для нормального режима обработки сенсорной информации (модули рассинхронизованы, слабая связь между колонками $K_{св}=10^{-4}$) и «патологического» режима обработки сенсорной информации (модули синхронизованы, сильная связь между колонками $K_{св}=0.1$).

Подавался внешний сигнал с периодически (T_{ef} = 200) изменяющейся амплитудой (первый вариант), постоянный сигнал (второй вариант) и сигнал в виде вспышек круглого пятна (третий вариант).

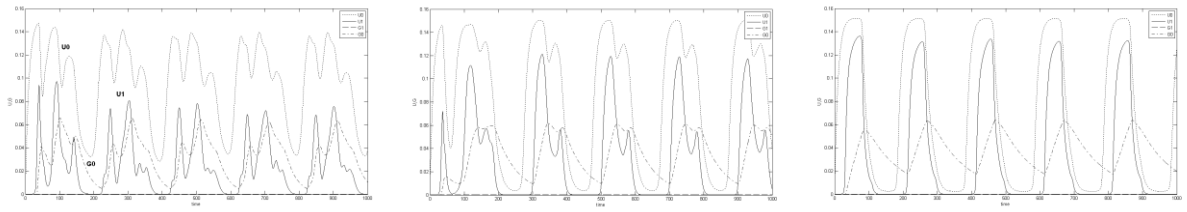
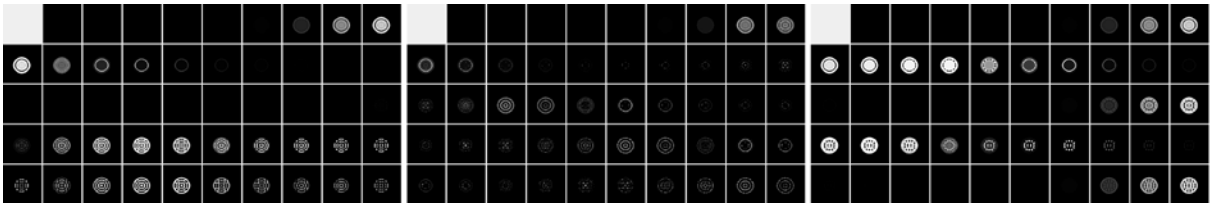
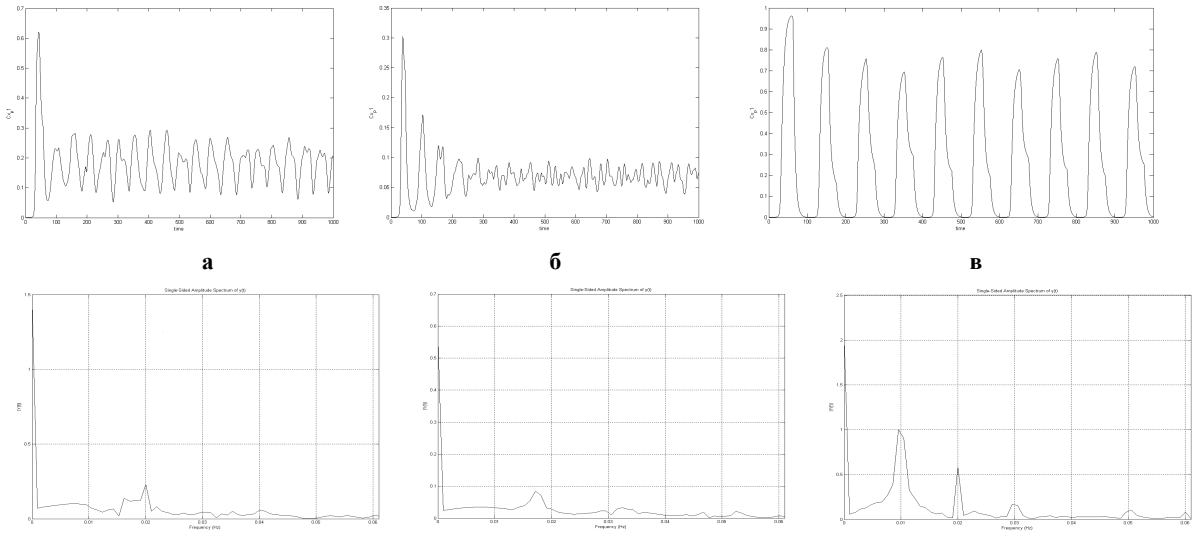


Рис. 2. Зависимость интегральной активности нейронных ансамблей коры для одной колонки от времени при характерных временах для периода внешнего сигнала T_{ef} = 200. Постоянная времени для коры 5; постоянная времени для ретикулярных ядер 30; 50; 100 (мелким пунктиром обозначены сигнал на таламусе, отслеживающий внешний сигнал, сплошной линией – сигнал на коре, крупным пунктиром – сигнал ретикулярных ядер таламуса)



а **б** **в**

Рис. 3. Пространственно-временные паттерны, показывающие процесс выделения объектов заданного размера из исходного изображения в нормальном режиме ($K_{св} = 10^{-4}$) для переменной, соответствующей пирамидам коры (характерное время для коры 5; для ретикулярных ядер таламуса T_{ret} = 50), для трех случаев: *а* – внешний сигнал в виде круга подаётся с периодически изменяющейся амплитудой (T_{ef} = 200); *б* – подается постоянный внешний сигнал в виде круга; *в* – подается периодический внешний сигнал в виде круга на 75 шагов по времени с интервалом в 25 шагов по времени



а **б** **в**

г **д** **е**

Рис. 4. Сигналы (зависимость интегральной активности четырех нейронных ансамблей коры от времени в режиме рассинхронизации колонок) (*а, б, в*) и амплитудные спектры этих сигналов (*г, д, е*) для трех перечисленных в рис. 3 случаев.

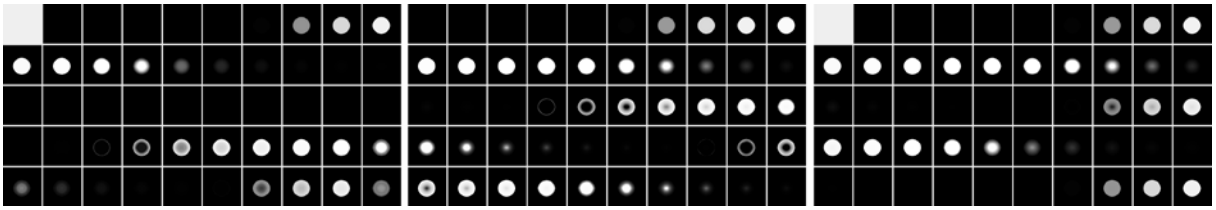


Рис. 5. Пространственно-временные паттерны в режиме «вспышечной» активность на коре (колонки синхронизованы $K_{св} = 0.1$) для трех случаев: *а* – внешний сигнал в виде круга подается с периодически изменяющейся амплитудой (T_{ef} = 200); *б* – подается постоянный внешний сигнал в виде круга; *в* – подается периодический внешний сигнал в виде круга на 75 шагов по времени с интервалом в 25 шагов по времени. Характерное время для коры 5; для ретикулярных ядер таламуса T_{ret} = 50

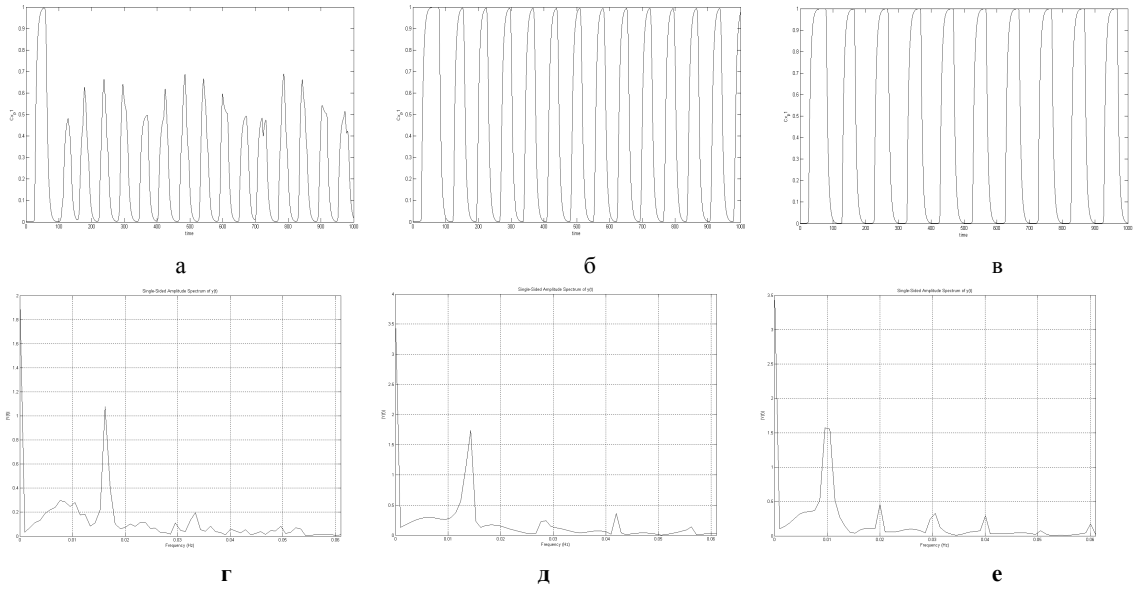


Рис. 6. Сигналы (зависимость интегральной активности четырех нейронных ансамблей коры от времени в режиме рассинхронизации колонок) (*а*, *б*, *в*) и амплитудные спектры этих сигналов (*г*, *д*, *е*) для трех перечисленных в рис. 5 случаев. В последнем случае имеет место навязывание ритма внешнего сигнала [9].

На рисунках 3 и 5 приведены пространственно-временные паттерны, показывающие процесс выделения объектов заданного размера из исходного изображения в нормальном режиме ($K_{св} = 10^{-4}$) для переменной, соответствующей пирамидам коры, и пространственно-временные паттерны в режиме «вспышечной» активность на коре (колонки синхронизованы K_c = 0,1).

Как известно из нейрофизиологических данных, пароксизмальная активность нейронов обуславливается синхронизацией электрической активности нейронных ансамблей в различных модулях и отражается на электроэнцефалограмме повышением частоты и амплитуды колебаний. Нервный субстрат остается неизменным, но система переходит в режим автоколебаний, чем обусловлено нарушение процесса восприятия. Для эпилепсии характерно возникновение в коре и подкорковых структурах пик-волновых разрядов широко генерализованной спонтанной высокоамплитудной активности.

Расчеты сигналов и их спектров в нормальном режиме, когда колонки рассинхронизованы (см. рис. 4), подтверждают нейрофизиологические данные в отношении амплитуды сигналов: в норме амплитуда сигнала меньше, чем в патологическом режиме, что показано на рис. 6.

При подаче внешнего сигнала в виде вспышек круглого пятна в расчетах имеет место навязывание ритма внешнего сигнала, что подтверждает данные, полученные в [9].

Авторы выражают глубокую признательность В.Г. Яхно за обсуждение и продвижение результатов работы на всех ее этапах.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки Российской Федерации «Эффекты межклеточной сигнализации и пластичности в нейрональных сетях мозга» (№ 2012-1.1-12-000-1001-069, соглашение от 20 июля 2012 г. № 8055), программами президиума РАН «Фундаментальные науки в медицине» и «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики».

Литература

1. *Coulter D.A.* Thalamocortical Anatomy and Physiology // Epilepsy : A Comprehensive Textbook / J. Engel (ed.), Jr. and T.A. Pedley. Piladelphia : Liippincott Raven Publisher, 1997. 341 p.

2. *Кудряшов А.В., Яхно В.Г.* Распространение областей повышенной импульсной активности в нейронной сети // Динамика биологических систем. 1978. Вып. 2. С. 45–59.

3. *Masterov A.V., Tolkov V.N., Yakhno V.G.* Spatio-Temporal Structures in Opto-Electronic Devices // Nonlinear Waves 1. Dynamics and Evolution / Eds. A.V. Gaponov-Grekhov, M.I. Rabinovich, J. Engelbrecht. Springer-Verlag, 1989. P. 168–184.

4. *Шевелёв И.А.* Волновые процессы в зрительной коре мозга // Природа. 2001. № 12. Режим доступа : http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/ NATURE/12_01/ALPHA.HTM.

5. *Данилова Н.Н.* Психофизиология : учебник для вузов. М. : АСПЕНТ ПРЕСС, 2000.

6. *Hecht-Nielsen R.* A theory of the cerebral cortex // Proceedings of the 6th International Conference on Molecular Electronics and Biocomputing, Future Electronic Devices Association of Japan, Okinawa, 28–30 November 1995.

7. *Соколов М.Е., Кузнецова Г.Д., Нуйдель И.В., Яхно В.Г.* Симулятор динамических процессов преобразования сенсорных сигналов в таламо-кортикальных сетях // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 117–130.

8. *Кузнецова Г.Д., Пелиновский Д.Е., Яхно В.Г.* Математические модели динамики волн распространяющейся депрессии в коре головного мозга // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 3/4. С. 86–99.

9. *Бондарь А.Т., Федотчев А.И., Шубина Л.В.* Нелинейные взаимодействия ритмов в центральной нервной системе // Настоящий сборник. С. 16–19.

Когнитивные состояния как психические явления

А.В. Орлов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород, orav@mail.ru

Психические явления традиционно принято подразделять на три категории: психические процессы, психические состояния и свойства личности. Методология изучения психических состояний достаточно противоречива. Существуют расхождения в трактовках психических состояний как явлений, понимании механизмов их детерминации и характера проявления. Мы рассматриваем психическое состояние как проявление результатов работы психических процессов в их совокупности, отражающее итог динамики психики на данный момент и создающее предпосылки её изменений в будущем.

Под психическими процессами мы понимаем внутренние динамические механизмы (прежде всего психофизиологические) реализации психических функций. Традиционно к ним относят процессы активности индивида (возбуждение и торможение), когнитивные процессы (восприятие, мышление и др.), эмоции, мотивационные и волевые процессы и т.п. Их функционирование разворачивается во времени, следствием чего является последовательная смена психических состояний. Соответственно основным функциям психики (активность, отражение, оценка, регуляция), выделяют функциональные блоки (субсистемы) психики: активационная, когнитивная, эмотивная, направляющая (мотивационная) и соответствующие им типы психических состояний.

По сравнению с другими психическими состояниями (тоническими, мотивационными, эмотивными), когнитивные психические состояния значительно менее изучены: отсутствует их классификация, критерии описания, принципы оценки и диагностики. Основой когнитивных состояний являются ментальные репрезентации разного типа (образы, понятия, установки, гипотезы, пропозиции, фреймы, сценарии и т. п.), которые порождаются психическими процессами и удерживаются в памяти человека.

Понимание сути когнитивных состояний и их качественных характеристик исходит из особенностей тех психических процессов, которые их порождают. Опираясь на методологию системного подхода, наиболее обосновано в первую очередь оценивать функциональное назначение того или иного состояния, механизм его порождения в структуре системных процессов, роль состояния в интеграции-дезинтеграции психической системы, положение в иерархии психических явлений, значение в динамике психики, участие в саморегуляции и тонкой настройке психических процессов.

Есть основания предполагать, что общие свойства когнитивных состояний аналогичны таковым для эмоциональных и мотивационных состояний. Чаще всего выделяют следующие характеристики психических состояний:

а) Интенсивность состояний – степень выраженности переживаний и сдвигов физиологических функций, при этом можно выделить некий континуум переживаний от слабовыраженных (например, волнение или раздражение) до наиболее интенсивных (например, ужас или гнев). Применительно к когнитивным состояниям можно выделить различные степени выраженности неопределенности, уверенности, понимания, отражения, узнавания и т. п.

б) Длительность состояний – характеристика существования состояния во времени. Соответственно, можно выделить состояния сверхбыстрые, кратковременные, долговременные, хронические; а также – периодические и непериодические.

в) Полезависимость состояний – чувствительность к влиянию внешних факторов и ситуации. Выделяют состояния ситуативные, т. е. определяемые преимущественно факторами конкретной ситуации, и трансситуативные, т. е. не зависящие от ситуации.

С позиций системного подхода можно выделить другие характеристики психических состояний:

1) Иерархическая организация. Психика имеет сложную системную организацию, в которой отдельные элементы находятся в суб- и надсистемных образованиях. Среди всего спектра состояний можно выделить базовые, сочетанные и интегративные формы. Под базовыми состояниями мы понимаем те, которые непосредственно связаны с работой конкретных психических процессов. Например, состояния возбуждения, торможения, комфорта или дискомфорта (положительные или отрицательные эмоциональные переживания). Базовыми когнитивными состояниями мы считаем состояния определенности и неопределенности.

Сочетанные состояния, по нашему мнению, это такие, которые являются результатом одновременного проявления и взаимодействия нескольких базовых состояний, различающихся природой лежащих в их основе процессов. Например, бессонница как сочетание возбуждения и торможения, тревога как одновременное проявление возбуждения, дискомфорта, предвкушения и неопределенности. Сочетание базовых состояний может быть разной степени интеграции: больше или меньше по глубине и масштабу. Собственно, интегративные состояния охватывают все психические процессы с формированием мощной доминанты, вследствие чего сами влияют на работу психических процессов по механизму как отрицательной, так и положительной обратной связи. Обладая свойствами доминанты, они в определенных условиях подавляют альтернативные состояния, синхронизируют психические процессы в определенном направлении психической динамики, усиливая или ослабляя проявления их работы.

Это состояния с выраженным вектором направленности. На наш взгляд, интегративные состояния задают определенный режим функционирования психики. К ним мы относим состояние стресса, состояния при различных видах деятельности, состояния творческой активности и др. Каждое психическое состояние можно охарактеризовать формой интеграции психических процессов, а также спецификой субъективных переживаний и степенью их осмысленности.

2) Полярность (диадность) состояний. Каждое состояние имеет свою альтернативу (печаль либо радость, наличие потребности либо ее отсутствие и др.), по знаку переживаний условно состояния можно поделить на положительные и отрицательные. Среди когнитивных состояний можно выделить следующие диады: определенность-неопределенность, уверенность-неуверенность, погруженность в объект познания – отстраненность и др. Некоторые диады когнитивных состояний, соответственно психическим процессам их порождающим, представлены в таблице.

3) Перемежаемость состояний. Диадность задает неустойчивость психических состояний, альтернативные режимы функционирования психики. Психическая система не может постоянно находиться в одном состоянии: покой сменяется активностью, определенность – неопределенностью, комфорт – дискомфортом и т.п. Смена состояний определяется, прежде всего, внутренними механизмами психики, которые обладают свойствами неустойчивости. При этом функционирование психики во времени может идти как с плавной динамикой (с флуктуациями), так и с катастрофическими (сверхбыстрыми) переменами.

4) Предзаданность состояний. Изменения в психике (смены состояний) чаще всего не случайны. При бифуркации идет выбор возможных альтернатив, т. е. относительно устойчивых состояний, к которым в данный момент времени может стремиться открытая нелинейная система психики. При этом изначально возможен только определенный набор таких состояний и соответственно путей их развития. Это ожидаемые состояния, в данный момент не существующие, а предстоящие. Это могут быть гипотетические образы своего будущего, ожидания, представления, предвкушения, настрой, визуализация, в целом некие личностно-когнитивные модели, которые являются предтечей тех или иных конечных состояний и выступают в роли вектора будущего развития.

Эти ожидаемые будущие состояния с одной стороны многогранны и динамичны, с другой четко определенны и устойчивы, так как только в данном случае может быть эффективным взаимодействие с внешней средой. Исходя из модели ожидаемого состояния, субъект, по большей части неосознанно, сам строит свою эволюцию, двигаясь в определенном направлении.

Ожидаемые состояния интегративны, они объединяют в субъективных переживаниях прошлое и будущее, выступают ориентиром развития, порождают индивидуальную субъективную картину мира, и себя в этой картине. Воплощенное в когнитивной модели ожидаемое интегральное психическое состояние – это одновременно и продукт осмысления объективной реальности, и психическое порождение, которое, несмотря на свою нематериальность, тем не менее, оказывает влияние на существование материального объекта (человека).

Диады когнитивных состояний

Процесс, лежащий в основе когнитивного состояния	**Положительный полюс**	**Отрицательный полюс**
Направленность воспринимающей системы на источник информации	Ориентировка	Дезориентировка
Концентрация воспринимающей системы на информации	Сосредоточение (интерес)	Рассеяние
Принятие информации воспринимающей системой	Облегчение принятия информации	Блокирование принятия информации
Ориентировка воспринимающей системы относительно источников информации	Привязка к источнику информации или к самой имеющейся информации	Поиск новой информации или новых источников
Детализация	Поиск дополнительной информации	Блокировка дополнительной информации
Извлечение эталонов	Узнавание информации	Не узнавание информации
Отображение информации – формирование элементарной когнитивной единицы	Ясное осознание информации (четкое распознавание, четкое воспроизведение)	Смутное осознание информации (нечеткое распознавание, нечеткое воспроизведение)
Сборка информации	Понимание	Непонимание (отсутствие понимания)
Преобразование элементарной когнитивной единицы	Схематизация – избавление когниции от излишней или противоречащей информации	Конкретизация – наполнение когниции дополнительной информацией
Сопоставление информации с ожиданиями	Релевантность – получение ожидаемой информации	Нерелевантность (в т. ч. удивление) – получение неожиданной информации
Сопоставление информации с внутренним эталоном или имеющимися знаниями и установками	Когнитивный консонанс – отсутствие противоречий информации с существующим внутренним эталоном	Когнитивный диссонанс – наличие противоречий информации с существующим внутренним эталоном
Сопоставление поступившей информации с новой поступающей информации	Уверенность – осознание безошибочности при отсутствии противоречий новой и старой информации	Неуверенность (сомнение) – осознание возможной ошибки при наличии противоречий новой и старой информации
Принятие решения	Умозаключение – формулировка решения (вывода) на основе принятой информации	Невозможность умозаключения – сложности в принятии решения, формулировке вывода
Рефлексия познания	Некритичность к принятому решению	Критичность к принятому решению

Когнитивные состояния могут рассматриваться как основа других психических состояний, ключевое проявление сознания. Их изучение – важное направление когнитивной науки.

Подход к детализации функции притяжения взгляда

В.А. Осинов, Д.Г. Шапошников

НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана Южного федерального университета, Ростов-на-Дону
vlad_os@list.ru

Модель формирования траекторий осмотра изображений, разработанная и представленная ранее [1], была значительно модифицирована. Основные направления модификации состояли в следующем: введение «когнитивного» компонента на основе сравнения разных изображений с помощью алгоритма оценки внешнего контекста; изменение дискретной структуры пространственно неоднородного входного окна на квазинепрерывную; детализация функции притяжения взгляда, влияющей на выбор точек фиксаций в процессе осмотра изображений

Введение

Одной из ключевых проблем в области психофизиологии зрения человека является понимание механизмов выбора точек фиксации взгляда и зрительного поиска при осмотре изображений.

Выбор областей интереса для фиксации взгляда при осмотре изображений и сцен зависит от множества факторов и определяется перцептуальными и когнитивными механизмами, взаимодействующими между собой [2; 3]. Несмотря на значительный прогресс в изучении механизмов зрительного внимания, достигнутый за последние 25 лет, многие аспекты этой проблемы далеки от полного понимания до настоящего времени [4]. Принимая во внимание неполноту имеющихся данных и в ряде случаев их противоречивость [5], математические модели, имитирующие нейробиологические феномены, будем рассматривать как важный инструмент при исследовании механизмов зрительного внимания и фиксации взгляда в процессе осмотра изображений.

Большинство известных моделей осмотра изображений, вслед за работой Коха и Ульмана [6], основано на обработке первичных признаков изображений, получении карт выделенности (saliency maps) и анализе пространственного распределения точек фиксации взгляда при осмотре изображений человеком. В настоящий момент продолжается активный поиск правил оценок признаков и формирования карты выделенности.

Характерной особенностью разрабатываемой нами модели является оценка признаков не всего изображения сразу, а содержимого входного окна, скачками движущегося по изображению. После конструирования карты выделенности для содержимого входного окна, центр окна перемещается в наиболее «интересный» регион, и этот процесс повторяется.

Такой подход открывает ряд новых возможностей:

1) возможность построения искусственных траекторий осмотра изображений и их сравнения с естественными траекториями, получаемыми в ходе тестов с участием человека;

2) возможность сравнения искусственных и естественных точек фиксаций напрямую;

3) возможность оценки дополнительных признаков изображения, основанных на сравнении содержимого нескольких входных окон, причем это содержимое может быть получено как при «осмотре» одного и того же изображения, так и нескольких, что эмитирует механизмы зрительной памяти человека.

Ранее в ходе наших исследований была разработана и представлена исследовательская математическая модель, позволяющая анализировать вклад факторов различного типа и механизмов разного уровня для исследования механизмов формирования траектории осмотра. С целью формализовать множество влияющих на перевод взгляда факторов, связанных со свойствами изображения, структурой поля зрения и с когнитивными процессами (преднастройка, предыдущий опыт, познавательные стратегии и др.), эта модель была значительно дополнена. В частности, существенно доработана функция притяжения взгляда, включающая в себя компоненты, которые могут влиять на перевод взгляда при осмотре изображений и определяющая координаты следующей точки фиксации.

Обеспечение устойчивости решения при построении траекторий осмотра изображений

При исследовании зависимости характеристик топологии осмотра изображений от параметров входного окна модели [1] было отмечено, что при изменении ряда параметров входного окна модели пространственные характеристики сканирования («осмотра») изображений с её помощью могут скачкообразно меняться. Было обнаружено, что при разной степени детализации угловой структуры входного окна варьировались расположение и площадь областей сканирования. В частности, при увеличении степени детализации входного окна от 72° к 18° площадь «осмотра» уменьшалась в 1,5 раза; напротив, количество групп последовательных 1-х смещений входного окна в траектории сканирования, а также количество смещений в таких группах увеличивалось – в 1,9 и 1,7 раза соответственно.

В то же время, кажется очевидным, что модель должна воспроизводить разные, но все же сходные по характеристикам траектории «осмотра» независимо от такого параметра, как детализация угловой структуры входного окна. Предполагается, что при уменьшении детализации вход-

ного окна точность воспроизводимой траектории должна уменьшаться, но при этом должны сохраняться такие общие характеристики, как расположение осмотренных областей и площадь области сканирования, однако степень изменения траекторий в имитационных экспериментах была значительно выше [1].

Такое поведение модельных траекторий «осмотра» было связано с тем, что структура входного окна была существенно дискретной (рис. 1). Она состояла из отдельных элементов-узлов, расположенных на пересечении концентрических окружностей и радиальных линий. Каждый узел входного окна описывался плотностью признаков, выделенных в его контекстной области, радиус которой увеличивался от центра к периферии окна. При изменении детализации угловой структуры входного окна точки осматриваемого изображение перераспределялись между контекстными областями узлов, что приводило к иному распределению плотности признаков и в конечном итоге к другой выбранной точке следующей фиксации.

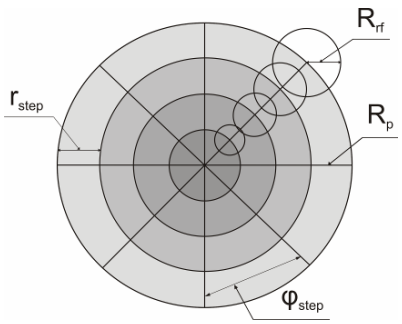


Рис. 1. Схема входного окна модели, представленной ранее [1]. R_p – размер входного окна; R_{rf} – размер контекстной области каждого узла входного окна; r_{step} и φ_{step} – параметры концентрической и радиальной структуры входного окна

Современные компьютеры обладают достаточной вычислительной мощностью для проведения математических экспериментов с использованием сенсоров, обладающих уменьшенным угловым шагом, увеличенным радиусом охвата изображения, а также различных форм.

Для преодоления неустойчивости построения траекторий «осмотра» в текущей версии была разработана квазинепрерывная структура входного окна.

Добавление когнитивного компонента на основе сравнения сходных объектов разных изображений

В настоящее время складывается понимание необходимости пересмотра подходов к моделированию управления глазными движениями [7]. Имеются лишь единичные работы, в которых рассматриваются возможные подходы к моделированию и оценке когнитивных механизмов. Так, в частности, в работе [8] предлагается автоматическое детектирование ряда объектов: лиц людей, автомобилей. Однако число разновидностей детектируемых объектов заведомо ограничено, и выделение областей изображения, занятых этими объектами, производится искусственными методами компьютерного зрения.

В совместной работе исследователей университета Бостона и подразделения “Google Research” [9] представлен алгоритм для выделения наиболее значимых объектов изображения, основанный на оценке внешнего контекста в последовательности изображений. Карта признаков, получаемая в результате этого алгоритма, является нормализованной средней абсолютной разницей между анализируемым изображением и наиболее схожими с ним изображениями, выбранными из базы. Таким образом, объекты сравниваются не с другими элементами того же изображения (внутренний контекст), а с объектами других изображений (внешний контекст). Этим эмулируется влияние предшествовавшего осмотру опыта: элементы, отличающиеся от аналогичных элементов сходных объектов, привлекают больше внимания (рис. 2).

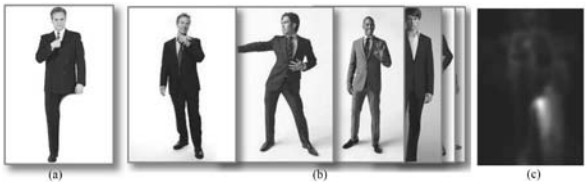


Рис. 2. Область выделенности на основе оценки внешнего контекста (цитировано по [9]): (a) анализируемое изображение, (b) наиболее схожие изображения из базы, (c) результат работы алгоритма

В проведенных нами ранее вычислительных экспериментах [10] была проверена возможность идентификации областей интереса с помощью алгоритма оценки фактора внешнего контекста изображения по методу, описанному выше. Тестирование алгоритма анализа внешнего контекста показало, что выделенные области совпали с областями интереса, идентифицированными в психофизических экспериментах, в 83% случаев.

Таким образом, оценка внешнего контекста изображения может учитываться моделью формирования траектории осмотра в качестве фактора притяжения взгляда. Однако было также отмечено, что в тех случаях, когда алгоритм был успешен, могло производиться сравнение объектов разной природы. Например, изображение птицы, летящей на фоне пасмурного неба, сопоставлялось с фотографией черного футляра, лежащего на сером столе, так как изображения в целом были схожи: серый фон и темный объект в центре. Это связано с тем, что при поиске сходных изображений изображения сравниваются целиком.

Это приводит к необходимости добавления фактора внешнего контекста не в форме карты признака для всего изображения, как предполагалось ранее, а в качестве динамической оценки содержимого фовеального входного окна модели. В отличие от алгоритма оценки фактора внешнего контекста изображения, где производится сравнение изображения с рядом сходных изображений, эта оценка должна производиться на основе сравнения содержимого входных окон модели.

Разработанная ранее модель успешно применялась для запоминания, сравнения и поиска элементов лиц на изображениях [11], однако для реализации универсального алгоритма оценки фактора внешнего контекста требовала существенной доработки, в частности изменения входного окна модели и перехода к более детальному квазинепрерывному отображению её содержимого.

Входное окно модели

В целом модель состоит из двух взаимодействующих компонентов: входного окна, обрабатывающего регион текущей «фиксации», и функции притяжения взгляда, на основе которой производится оценка содержимого входного окна с целью выбора следующей точки «фиксации».

При анализе фрагментов изображений в каждой точке фиксации входного окна модели воспроизводится снижение чёткости и цветовой чувствительности воспринимаемого глазом человека изображения от фовеа к периферии (рис. 3). Эти два процесса происходят независимо друг от друга. Уровень размытия (blurring) и степень восприятия цвета определяются согласно распределениям Гаусса со стандартными отклонениями σ_{blur} и σ_{color} соответственно.

Рис. 3. Фрагмент изображения и соответствующее ему содержимое входного окна модели

Радиус размытия увеличивается от центра к периферии:

$$R_{blur} = k\cdot(1 - f(r\ , \sigma_{blur}) / f(0, \sigma_{blur})), \qquad (1)$$

где r – расстояние от точки до центра входного окна, k – коэффициент пропорциональности, $f(r, \sigma_{blur})$ – функция Гаусса.

Насыщенность цвета уменьшается от центра к периферии:

$$C = C_0\cdot f(r, \sigma_{color}) / f(0, \sigma_{color}) \qquad (2)$$

Движущаяся по изображению область внимания человека не обязательно имеет круглую форму. В модели форму входного окна определяют 4 параметра: размер окна вверх, вниз, вправо и влево от центра (r_{up}, r_{down}, r_{right}, r_{left}). В случае неравенства этих параметров окно будет некруглым, а величина r формул (1) и (2) пересчитывается:

$$r = r_0\cdot r_{max} / r_{ell}, \qquad (3)$$

где r_0 – расстояние от точки до центра входного окна, $r_{max} = \max(r_{up}, r_{down}, r_{right}, r_{left})$, r_{ell} – радиус эллипса, определённого полуосями, длины которых равны двум соответствующим положению точки параметрам размера входного окна.

Функция притяжения взгляда

В программно реализованной текущей версии модели предусмотрен анализ таких признаков локальных областей изображений, как цвет, яркость, ориентации цветовых перепадов и т.п., и на основе этих оценок строятся карты признаков для текущего содержимого входного окна. Из полученных карт признаков, в свою очередь, формируется карта выделенности, имеющая размер анализируемого содержимого входного окна и содержащая значения относительной «притягательности» точек для взгляда человека. Все операции с цветом производятся в цветовом пространстве CIE L*a*b*. Итоговая карта подвергается сильному размытию для компенсации возможного шума, после чего наиболее «выделяющийся» регион становится целью следующей «фиксации» входного окна.

Таким образом, ключевой частью модели является функция притяжения взгляда, определяющая наиболее оптимальную следующую точку «фиксации» входного окна. Функция притяжения включает в себя компоненты, которые могут влиять на перевод взгляда при осмотре изображений, и является формальным описанием всей модели.

Пусть x_W, y_W – координаты центральной точки входного окна; x_{glob}, y_{glob} – координаты точки на изображении; $x(x_W, x_{glob})$, $y(y_W, y_{glob})$ – координаты текущей точки относительно центральной точки входного окна. Тогда функция притяжения в точке будет равна

$$F(x, y) = \omega_1\cdot gradient(x, y, W) + \omega_2\cdot center(x_{glob}, y_{glob}) - \\ - \omega_3\cdot IoR(x_{glob}, y_{glob}, XY, \sigma_{IoR}, d, A) - \\ - \omega_4\cdot scotomas(x, y, D) + \omega_5\cdot AoI(x_{glob}, y_{glob}, XY) + \\ + \omega_6\cdot extrinsic(x, y),$$

где: $\omega_1 \ldots \omega_6$ – весовые коэффициенты отдельных факторов;

$W(x_W, y_W, \sigma_{color}, \sigma_{blur}, A)$ – карта с результатами обработки фрагмента изображения в каждой текущей «фиксации» входного окна;

σ_{color}, σ_{blur} – стандартные отклонения распределений Гаусса, определяющих уровень размытия изображения и степень восприятия цвета;

$A = \{ r_{up}, r_{down}, r_{right}, r_{left} \}$ – параметры, определяющие форму входного окна, его размер вверх, вниз, вправо и влево от центральной точки;

$gradient(x, y, W)$ – градиент цвета для точки, вычисленный оператором Щарра [12] в цветовом пространстве CIE L*a*b* для ряда масштабов;

$center(x_{glob}, y_{glob})$ – оценка близости точки к центру изображения;

$IoR(x_{glob}, y_{glob}, XY, \sigma_{IoR}, d, A)$ – торможение возвращения («Inhibition of Return»), фактор «памя-

ти», учитывающий расположение предшествовавших точек «фиксаций» входного окна;

XY = { $\{x_{1W}, y_{1W}\}$, { x_{2W}, y_{2W} } … { x_{nW}, y_{nW} } } – предшествовавшие координаты центральной точки входного окна;

σ_{IoR} – стандартное отклонение распределения Гаусса, определяющее величину области влияния точки каждой «фиксации»;

d – скорость уменьшения влияния предшествовавших точек «фиксаций»;

scotomas(x, y, D) – влияние физиологических (слепые пятна) и патологических скотом;

D – данные о положении и размерах скотом;

AoI(x_{glob}, y_{glob}, XY) – близость к областям интереса, выделенных по пространственному распределению точек «фиксаций» [10];

extrinsic(x, y, W) – оценка внешнего контекста.

Общее же число слагаемых функции притяжения не ограничено и может в дальнейшем быть увеличено для соответствия числу учтенных факторов притяжения взгляда.

Заключение

Предварительное тестирование разработанной новой версии модели показало возможность плавного изменения структуры траектории при вариации тех или иных параметров.

Дальнейшим этапом работы является оптимизация параметров модели для наиболее полной имитации траекторий, записанных в ходе психофизических экспериментов при осмотре изображений. Предполагается, что итоговая версия модели позволит количественно оценить вклад различных типов зрительного внимания на последовательных этапах решения текущей зрительной задачи.

Также идёт работа по воспроизведению симуляции предшествовавшего «осмотру» опыта на основе оценки внешнего контекста [10], для чего необходимо создание сравнительной базы фиксаций взгляда во время психофизических тестов.

Результаты ведущейся работы по оптимизации параметров модели и реализации зрительной «памяти» (алгоритм оценки внешнего контекста) будут представлены в докладе.

Работа поддержана грантами РФФИ № 11-01-00750а, № 12-01-31266мол_а, РГНФ № 11-06-00704а и грантом им. А.Б. Когана НИИ нейрокибернетики ЮФУ.

Литература

1. *Осинов В.А., Шапошников Д.Г., Колтунова Т.И., Подладчикова Л.Н.* Динамика пространственно-временных характеристик осмотра изображений: модель и эксперимент // Электронный рецензируемый журнал «Нейроинформатика». 2012. Т. 6, № 1. http://www.niisi.ru/iont/ni/Journal/V6/N1/.

2. *Ярбус А.Л.* Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965.

3. *Unema P.J.A., Pannasch S., Joos M., Velichkovsky B. M.* Time course of information processing during scene perception: The relationship between saccade amplitude and fixation duration // Visual Cognition, 2005, 12, 473 – 494.

4. *Carrasco, M.* Visual Attention: The past 25 years // Vision Research, 2011, 51, 1484-1525.

5. *Pastukhov A., Fischer L., Braun J.* Visual attention is a single, integrated resource // Vision Research, 2009, 49(10), 1166–1173.

6. *Koch C., Ullman S.* Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry // Human Neurbiology, 1985, 4:219–227.

7. *Tatler B.W., Hayhoe M.M., Land M.F., and Ballard D.H.* Eye guidance in natural vision: reinterpreting salience // Journal of Vision, 2011, 11, 5.

8. *Tilke Judd, Krista Ehinger, Frédo Durand, Antonio Torralba.* Learning to Predict Where Humans Look // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2009.

9. *Meng Wang, Janusz Konrad, Prakash Ishwar, Kevin Jing, Henry A. Rowley*: Image saliency: From intrinsic to extrinsic context // CVPR, 2011: 417-424.

10. *Осинов В.А., Шапошников Д.Г.* Различные типы «Областей интереса» в модели формирования траектории осмотра сложных изображений // Материалы XVI международной конференции по нейрокибернетике. Том 2. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2012. С. 146-149.

11. *Anishchenko S., Osinov V., Shaposhnikov D.* Assessment of Human Head Pose in Human–Computer Interaction // Pattern Recognition and Image Analysis, 2012, Vol. 22, No. 4, p. 541–545.

12. *Jähne B., Scharr H., and Körkel S.* Principles of filter design // Handbook of Computer Vision and Applications. Academic Press, 1999.

Реализация принципа структурной когерентности в моделях когнитивной динамики

Ю.А. Прокопчук

Институт технической механики НАНУ и ГКАУ, Днепропетровск
Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск
itk3@ukr.net

Автором предложена и развивается конструктивная версия механизма предельных обобщений и полимодельной дополнительности как парадигмального базиса, показана ее продуктивность в исследованиях, связанных с анализом различных познавательных ситуаций и решением теоретико-прикладных проблем когнитивной науки [1, 2]. Синергетический эффект использования разных формализмов в сочетании с движущей силой обобщения и самодвижения составляет основу для глубинной интеграции знаний сложных интеллектуальных систем.

В рамках парадигмы предельных обобщений к числу базовых относятся декогерентные и рекогерентные модели трех взаимосвязанных информационно-энергетических сущностей [2]:

орграфов значений, доменов, набросков (целое представляется суперпозицией набросков);

динамических системопаттернов;

структурной энергии.

Системопаттерны образуют каналы движения структурной энергии. Элементы-сущности находятся в постоянном движении из-за своей структурной неустойчивости (структурного разнообразия), что создает внутренние движущие силы и обеспечивает самодвижение. Трехсущностные взаимодействия порождают виртуальную сплошную среду, которая может служить моделью субъективной реальности [3].

В работе [2] построены формальные модели спонтанной когнитивной динамики, которые демонстрируют самодвижение, процесс неосознанного выделения параметров порядка, формирования критичных (предельных) структур знаний, а также имплицитного опыта. Подобные модели могут найти применение при создании партнерских систем и систем с распределенным интеллектом в различных предметных областях, включая образование [1].

Принцип «структурной когерентности», по-видимому, впервые предложен Чалмерсом [4]. Он эксплицирует систематическую связь между «сознанием» (consciousness) и «осведомленностью» (awareness). Материальная система осведомлена в чем-то, когда это нечто непосредственно доступно для тех ее подсистем, которые отвечают за формирование ее поведения. Говоря словами Чалмерса, осведомленность есть «непосредственная доступность для глобального контроля». Большое значение имеет реализация данного принципа в антропоцентрических системах [5, 6].

Целью данной работы является формальный анализ механизма проявления принципа структурной когерентности в когнитивных архитектурах и когнитивной динамике. Рассмотрение данного вопроса позволит лучше понять, что общего и какие различия существуют между искусственными и естественными когнитивными системами, а также наметить пути практической реализации ключевых феноменов.

Концепция орграфа значений и структурной энергии. Произвольные модальности, характеристики, категории, свойства, качества, квалиа (qualia), признаки явлений действительности и субъективной реальности обозначим одним термином *тест*. Любой тест может принимать определенные значения.

Под *значением* будем понимать некую бесструктурную (нульмерную) единицу, обладающую двумя устойчивыми состояниями: «есть значение» (синоним – «активно») и «нет значения» («неактивно»). Как физические сущности значения могут обладать простейшими распознающими свойствами (автоматизмами), позволяющими им изменять собственное состояние в зависимости от состояния других значений. Значения в разных состояниях могут синтезировать и генерировать определенные осциллирующие энергетические поля разной модальности (например, «положительные/отрицательные» или «квазидетерминированные/хаотические»). Эти поля могут распространяться как по выделенным каналам (системопаттернам), связывающим разные значения, так и распределенно в пространстве. Собственно совокупное воздействие всех полей и определяет конкретное состояние того или иного значения. Кроме того, разные значения могут находиться в связанном или запутанном состоянии (квантово-семантическое запутывание [1]). Понятие «значения», таким образом, объясняет природу основных дуализмов субъективного: дискретное – непрерывное, локальное – нелокальное (квантовое), детерминированное, обусловленное – случайное.

Для целей моделирования под значениями будем понимать как собственно значения, так и коды, метки, пейсмекеры (берущие на себя инициативу, задающие активность, стиль, ритм действий), ссылки, указатели на комплексные структуры и процессы [2]. Пусть $\{\tau\}$ – множество элементарных тестов, с помощью которых описываются любые явления или ситуации действительности. Конкретный результат теста τ будем обозначать $\underline{\tau}$. Множество значений теста τ с обобщающими связями назовем *орграфом значений* и обозначим [2]

$$Gv(\tau) = \{a \to_e b\}_\tau,$$

где *a, b* – значения теста (*b* обобщает *a*; *a* детализирует *b; a* эквивалентно *b*: $a \leftrightarrow_e b$); *e* – структурная энергия. Фундаментальная триада ($a \rightarrow_e b$), реализуя *сильные связи*, является простейшим системопаттерном и базовым конструктом смысла. Структурная энергия связана со всеми элементами орграфа: как со значениями, так и со связями (проводимость связей). Следовательно, в каждый момент времени с каждым значением теста связан определенный уровень структурной энергии (энергия активации): $\forall t$, $\{<\underline{\tau}, e>\}_t$. Если значение является указателем (ссылкой, пейсмекером), то энергия активации отражает степень возбуждения подчиненной структуры. Пример орграфа значений показан на рис. 1.

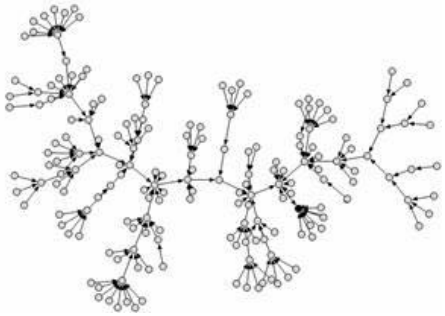


Рис. 1. Пример орграфа значений

Все орграфы значений погружены в активную физическую среду, которую для определенности назовем *виртуальной сплошной средой* (ВСС) [1]. Необходимость такого погружения вытекает из пространственной ограниченности самоорганизующихся систем. Как активная среда ВСС принимает участие в нелокальной передаче структурной энергии и соответственно информации между орграфами значений, обеспечивая тем самым дуализм локальное-нелокальное или дискретное-непрерывное. Орграф значений является, следовательно, специфической приемо-передающей (структурную энергию) антенной. Концепция ВСС наделяет клубок орграфов значений тестов (модальностей) реальными физическими свойствами.

В ряде приложений отсутствие активности какого-либо значения $\underline{\tau}$ может трактоваться как активность отрицания данного значения, т.е. активность $\underline{\neg\tau}$ (допускается своего рода *отрицательная энергия*). Данная возможность играет важную роль в структурогенезе одной из разновидностей орграфов значений, а именно, орграфов доменов тестов [1]. Кроме того, активность отрицаний значений позволяет рассматривать волновые колебания структурной энергии в рамках всего орграфа значений независимо от первичной активности той или иной его части (пояснения ниже). Другими словами, вершинами орграфа являются не пары $<\underline{\tau}, e>$, а связки $<\underline{\tau}, e^+>/<\underline{\neg\tau}, e^->$, где e^+, e^- – соответственно положительная и отрицательная энергии. Нулевая энергия, как результат взаимокомпенсации положительной и отрицательной активности, будет соответствовать *значению неопределенности*. В этом проявляется двойственность значений орграфа.

Развитие данной интерпретации позволяет применить квантовый подход, а именно: оппозицию ($\underline{\tau}$, $\underline{\neg\tau}$) рассматривать как *кубит* – базовую единицу квантовой информатики (аналог 0-1), т.е. неразделяемую суперпозицию противоположных значений со всеми вытекающими последствиями, в частности *квантовым запутыванием* смежных значений (свойством *нелокальности*).

Для орграфа значений характерны два свойства: «разделенность» (на кванты – значения) и «целостность» (связанность отношениями разных значений, главное из отношений – принадлежность одной модальности). Как отдельные значения, так и совокупности значений (орграфы значений, доменов, набросков) могут находиться в связанном или запутанном состоянии. Важную роль в связывании разных орграфов играют системопаттерны и их разновидности – идеальные закономерности, которые служат каналами передачи структурной энергии [2]. Таким образом, элементарной «клеточкой», порождающей идеальные феномены, оказываются постоянно возникающие (энергетические) отношения между двумя и более дискретностями-значениями и сильный принцип qui pro quo (кви про кво́ – одно вместо другого). Последний ассоциируется с принципом обобщения: одни значения обобщают и заменяют другие значения.

Орграфы значений, в свою очередь, также являются дискретностями. Целостностью является фрактальное феноменологическое пространство [1]. Целостность такого пространства обеспечивается взаимодействием орграфов значений, системопаттернов и структурной энергии. Таким образом, феноменологическое пространство не только дискретно, но одновременно и целостно, т. е. замкнуто само на себя (системная и операциональная замкнутость). Возможно, из этой диалектики дискретного и целостного, локального и нелокального, детерминированного и случайного может вытекать фундаментальная основа теории идеальности специальным образом организованной материи.

Структурная когерентность на уровне орграфа значений. Произвольные вершины *a* и *b* орграфа $Gv(\tau)$ назовем *связанными*, если между ними существует последовательность переходов обобщения по вершинам орграфа. Произвольную последовательность переходов обобщения между связанными вершинами *a* и *b* орграфа $Gv(\tau)$ назовем *смысловой траекторией* (обобщения).

Две вершины-значения *a* и *b* орграфа $Gv(\tau)$ назовем *альтернативными*, если не существует вершины *c* (возможно совпадающей с одной из вершин *a* или *b*), для которой определены смысловые траектории $(c\uparrow b)_\tau$ и $(c\uparrow a)_\tau$.

Для каждого значения *a* орграфа $Gv(\tau)$ определим *элементарный орграф обобщения* или *конус обобщения* $Gv^\uparrow(\tau|a)$, который является фрагментом $Gv(\tau)$ и содержит все смысловые траекто-

рии, начинающиеся с *a* (в том числе и само значение *a*). С введением сущности «конус обобщения» появляется возможность уточнить специфику распространения структурной энергии, а именно: *активность значения a* распространяется по всему конусу обобщения $Gv^{\uparrow}(\tau|a)$. Другими словами, если активно *a* (активна задача *a*, активна функциональная система *a* и т. п.), то активны все значения (все задачи, все функциональные системы) конуса обобщения, и соответственно все вложенные конусы обобщения (определяя тонкую структуру активности). В этом состоит одно из главных свойств орграфа значений. Так как разные конусы могут пересекаться, то имеет место суперпозиция энергетических волн активности. Важность данного свойства определяется тем, что активность одного значения порождает *неразделяемую суперпозицию активности* множества значений, а все активные значения участвуют в моделировании ситуации действительности. В этом суть принципа структурной когерентности на уровне орграфа значений.

Когерентная активность значений в рамках орграфа $Gv^{\uparrow}(\tau|a)$ означает осведомленность на элементарном квалитативном (тестовом) уровне, что позволяет узнать многое о внутренней организации сознательных состояний. Ведь структура сознательного опыта отражает особенности протекания объективных когнитивных процессов, ответственных за его появление.

Наряду с конусом обобщения для каждого значения *a* орграфа $Gv(\tau)$ определим *элементарный орграф детализации* или *конус детализации* $Gv^{\downarrow}(\tau|a)$, который является фрагментом $Gv(\tau)$ и содержит все смысловые траектории, заканчивающиеся на *a*. Структурная энергия, формирующая активность значения *a*, определенным образом распространяется внутри конуса детализации $Gv^{\downarrow}(\tau|a)$. Для моделей распространения энергии в конусе детализации могут применяться модели *диффузии* или *перколяции*, в частности *волновой перколяции*. Совокупность вершин-значений, по которым происходит «протекание» энергии, называется *перколяционным кластером*. Пример конуса детализации/обобщения на основе стохастического дерева Кейли показан на рис. 2 (каждая бифуркация – это отдельное значение).

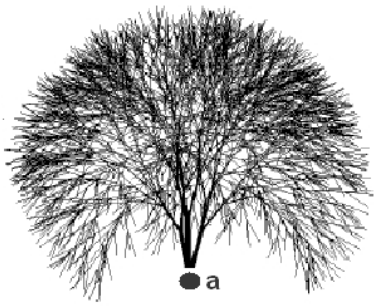


Рис. 2. Пример конуса обобщения/детализации для значения *a*

Любой орграф значений $Gv(\tau)$ одновременно представим в виде структурной композиции конусов обобщения всех базовых значений и в виде структурной композиции конусов детализации всех терминальных значений, а именно:

$$Gv(\tau) = \otimes_{i=1,..,n} Gv^{\uparrow}(\tau|a_i) = \otimes_{i=1,..,m} Gv^{\downarrow}(\tau|b_i).$$

Конус детализации терминальной вершины орграфа значений представляет собой не что иное, как полную *область притяжения вершины-аттрактора* (точечный аттрактор, см. рис. 1). Таким образом, орграфы значений позволяют применять важнейшие понятия нелинейной динамики, такие как «траектории», «воронки притяжения», «аттракторы» и др. Следует отметить также высокую *робастность* процессов на основе конусов детализации.

Структурная когерентность на уровне образа. Пусть образ описывается с помощью 9 тестов, каждый из которых представлен элементарным конусом детализации (рис. 3).

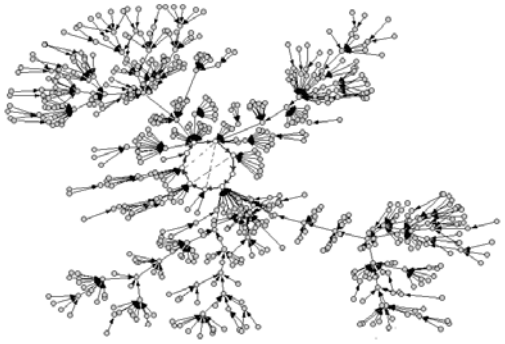


Рис. 3. Репрезентация образа

Набросок образа будем называть совокупность любых девяти значений тестов. Возбуждение первичного образа-наброска $P_0 = \{a\}$ приводит, в частности, к возбуждению всех 9 терминальных вершин – аттрактора процесса распространения структурной энергии (центральный круг из светлых вершин). Конусы детализации в совокупности образуют область притяжения аттрактора. Аттрактор (притягивающее множество) является финитным (предельно обобщенным) наброском любого первичного наброска образа $P_0 = \{a\}$. Если он будет одновременно и уникальным наброском (в рамках некоторой базы прецедентов), то он будет самой энергетически экономной репрезентацией образа. Если финитный аттрактор не является уникальным, то существуют критические наброски – аттракторы [1].

На рис. 3 показаны связи между значениями аттрактора (светлые вершины). Эти связи-системопаттерны (включая пунктирные линии) не относятся к типу обобщение – детализация. Они могут отображать как циркуляцию структурной энергии вдоль аттрактора (предельный цикл, странный аттрактор), так и возможность «запуска» аттрактора определенными его фрагментами. Эти фрагменты определяются предельными идеальными закономерностями (предельными синдромами) [1, 2].

Полное множество набросков $\{P\}$, индуцированных первичным наброском $P_0 = \{a\}$, можно

представить как прямое произведение конусов обобщений (полное множество кортежей, в каждом из которых по одному значению всех тестов с учетом активности)

$$\{P\}_{\{a\}} = Gv^{\uparrow}(\tau_1|a_1) \times_e Gv^{\uparrow}(\tau_2|a_2) \times_e \cdots \times_e Gv^{\uparrow}(\tau_n|a_n).$$

Наброски образуют орграф набросков вида: $Gs(W) = \{P \to_e P'\}_W$, где W – первичный образ; P, P'– наброски; e – структурная энергия. Данное выражение иллюстрирует принцип структурной когерентности в масштабе образа.

Набросок P_0 является самым точным, все остальные наброски являются его обобщением. Финитные или предельно обобщенные наброски образуются путем сочетания терминальных значений конусов $Gv^{\uparrow}(\tau_i|a_i)$. Управляя градиентом перераспределения энергии в сторону набросков из окрестности P_0 или в сторону финитных набросков, можно добиться большей или меньшей четкости образа. Сужение области активных набросков (коллапс, редукция волновой/энергетической функции, фазовый переход) требует развитого механизма «усиление-торможение» и значительных затрат энергии (на работу этого механизма). Сужение или коллапс активной области до одного наброска лежит в основе механизма *осознания*. Подобный механизм развился в процессе эволюции, по всей видимости, только у человека, что привело к *логической форме мышления* (управляемому переходу между единичными набросками разных образов).

Колебания распределения энергии на множестве набросков могут быть интерпретированы как разновидность *субъективных переживаний*.

Структурная когерентность на основе орграфов доменов и идеальных закономерностей. Значения тестов могут выбираться из разных доменов. Для фиксации того, что в качестве множества результатов теста τ используется домен T, будем использовать нотацию: τ/T. Конусы детализации и обобщения масштабируются до уровня орграфа доменов $G(\tau)$ и орграфа набросков $Gs(W)$. Так, для любого значения $\underline{\tau}/T$ в рамках орграфа доменов $G(\tau) = \{T \to_e T'\}_\tau$ определен *конус детализации* -$G^{\downarrow}$:

$$G^{\downarrow}(\underline{\tau}/T) = \{\underline{a}/A \mid \underline{a}/A \to_G \underline{\tau}/T\}, \quad (1)$$

где символ ↓ означает конкретизацию (информационную инфляцию). В вырожденном случае конус состоит из одного элемента $\underline{\tau}/T$.

Для любого значения $\underline{\tau}/T$ в рамках $G(\tau)$ определен также *конус обобщения* – $G^{\uparrow}$, а именно:

$$G^{\uparrow}(\underline{\tau}/T) = \{\underline{a}/A \mid \underline{\tau}/T \to_G \underline{a}/A\}, \quad (2)$$

где символ ↑ означает обобщение.

Для решения той или иной когнитивной задачи (Z-задачи) формируется множество прецедентов с известными исходами $\Omega = \{\alpha(\{\underline{\tau}/T\}, \underline{z}/Z)\}$, где $Z = \{1,\ldots, N\}$ – множество заключений (диагнозов, прогнозов, управлений); $\{\underline{\tau}/T\}$ – множество значений тестов. Через $\Omega(\{\tau/T_0\})$ обозначим априорные описания прецедентов. Для теста «Исходы/заключения» задан орграф доменов $G(z)$, следовательно, Z – это один из доменов $G(z)$.

Контекстом Z-задачи назовем кортеж K=<$\Omega(Z)$, $\{G(\tau)\}$, $G(z)$>. Заданием K любой прецедент *погружается в контекст* K. Будем считать, что $\{\tau\}$ – полный набор тестов в рамках Банка тестов $\{G(\tau)\}$. *Идеальной закономерностью* V в рамках контекста K назовем произвольную совокупность значений тестов, позволяющую однозначно установить заключение: $V = (\{\underline{a}/A\} \to \underline{z}/Z)$, $\exists\alpha(\{\underline{\tau}/T\}_\alpha, \underline{z}/Z) \in \Omega(Z)$: $\{\underline{a}/A\} \subseteq \{\underline{\tau}/T\}_\alpha$. Компактная запись: $V(\{\underline{a}/A\}, \underline{z}/Z)$. «Идеальность» закономерности вытекает из субъективного характера банка тестов. Закономерность является разновидностью системопаттерна.

Можно показать, что если $V(\{\underline{a}/A\}, \underline{z}/Z)$ закономерность в рамках контекста K, то любое множество значений тестов $\cup_{\{a\}}(\underline{b}/B|\ \underline{b}/B \in G^{\downarrow}(\underline{a}/A))$ и любое заключение $\underline{z}'/Z' \in G^{\uparrow}(\underline{z}/Z)$ образуют закономерность $V(\{\underline{b}/B\}, \underline{z}'/Z')$ при условии

$$\exists\alpha(\{\underline{\tau}/T\}_\alpha, \underline{z}/Z) \in \Omega(Z): \{\underline{b}/B\} \subseteq \{\underline{\tau}/T\}_\alpha. \quad (3)$$

Из данного факта вытекает, что закономерность $V(\{\underline{a}/A\}, \underline{z}/Z)$ может привести к ПЕРЕНОСУ (не учету условия (3)) или квантово-семантическому (QS) запутыванию конусов. Последнее олицетворяет принцип структурной когерентности:

$$QS\text{-}V(\{\underline{a}/A\}, \underline{z}/Z) = \{\otimes_{\{a\}} G^{\downarrow}(\underline{a}/A)\} \otimes G^{\uparrow}(\underline{z}/Z). \quad (4)$$

В работе [1] рассматривалась структурная когерентность также на уровне орграфов набросков и функциональных систем (сред радикалов).

Заключение. Модели базовых идеальных сущностей позволяют привлечь к описанию идеальных феноменов (когнитивной динамики) мощный арсенал средств нелинейного подхода, а также раскрыть механизм действия принципов предельного обобщения, квантовой семантики, структурной когерентности, адаптивного резонанса как на уровне отдельного орграфа значений, отдельного образа, так и на уровне всего феноменологического пространства.

Литература

1. *Прокопчук Ю.А.* Принцип предельных обобщений: методология, задачи, приложения. Днепропетровск : ИТМ НАНУ и НКАУ, 2012. 384 с.

2. *Прокопчук Ю.А.* Модели когнитивных архитектур и процессов на основе парадигмы предельных обобщений // Кибернетика и вычисл. техника. 2013. Вып. 171. С. 37-51.

3. *Дубровский Д.И.* Сознание, мозг, искусственный интеллект М. : Стратегия-Центр, 2007. 272 с.

4. *Chalmers D.* The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory. Oxford Univ. Press, 1996. 432 p.

5. *Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунов Б.Е.* Интеллектное управление динамическими системами. М. : Физматлит, 2000. 352 с.

6. *Прокопчук Ю.А.* Когнитивная модель деятельности // Сборник научных трудов «Индуктивное моделирование сложных систем». Киев : МНУЦ ИТС НАНУ и МОНУ, 2012. Вып 4. С. 177 – 188.

Функциональные модели базового элемента когнитивности – нейрона

А.Л. Проскура, Т.А. Запара, А.С. Ратушняк

Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН,
г. Новосибирск
ratushniak.alex@gmail.com

Наиболее актуальным направлением исследований и разработок в области нейронаук является изучение принципов работы мозга, создание на этой основе новых поколений информационных устройств, биотехнологических интерфейсов, биосенсоров, средств диагностики, профилактики и коррекции нейропатологий.

Попытки создания технических информационных систем, обладающих элементами когнитивности, проводятся в рамках известных международных программ, таких как: Blue Brain Project, BICA (Biologically Inspired Cognitive Architectures), программа создания систем нейроморфной электроники SyNAPSE под эгидой DARPA, IBM реализуется проект C2S2 – создания когнитивного компьютера. Еврокомиссия одобрила финансирование проекта по симуляции человеческого мозга. Brain Project объединит усилия европейских учёных на 2013–2023 гг.

Однако, несмотря на значительные усилия и затраты, принципиальные успехи в этой области пока не получены. Отсутствие таких успехов в работах обусловлено, прежде всего, недостатком концептуальных представлений о принципах и механизмах функционирования биологических прототипов когнитивных систем. Анализ и моделирование когнитивных систем требует разработки функциональной модели их базового элемента – нейрона. Разработано множество имитационных моделей нервных клеток. Однако большинство таких моделей строится без учета современных знаний о структурных и неразрывно с ними связанных функциональных свойствах нейрона. Огромное количество аналитических данных, получаемых в области нейронаук в последние годы, делает практически невозможным их глубокий анализ и систематизацию. Необходимы разработки новых способов представления данных и преобразования их в концептуальные знания. Однако, несмотря на трудности такого рода, можно, опираясь на экспериментальные результаты, предполагать, что в основе когнитивного поведения, осуществляемого на организменном уровне, лежат структурно-функциональные реакции нервных клеток [1–8] Во многих работах не учитывается, что именно усложнение молекулярной организации нейронов, по существующим сейчас данным, является основой эволюционного развития мозга. [3, 9, 10]. Показано, что эволюция мозга шла в большей степени за счет усложнения нейрональных элементов. Топология связей в меньшей мере влияет на когнитивные возможности.

При сравнении результатов функционирования имитационных моделей с параметрами биологических нейронов в редких случаях учитывается, то, что в основе их функционирования, как и у всех живых организмов, лежат мотивационные программы. Не учитывается один из самых важных аспектов – активное предсказательное взаимодействие нейронов с внешней средой обладающей элементами псевдонепредсказуемости. А именно в предсказании в таких условиях и поддержание гомеостаза на основе предсказания и заключено основное свойство и функция клеток и всех живых систем. Временна□я глубина предсказания, обусловленная возможностями внутриклеточной молекулярной информационной машины и объемом заложенных и накопленных в ней знаний, вероятно, может быть мерой когнитивности такой системы.

В последнее время накоплен значительный материал, позволяющий формировать представления о структурно-функциональных свойствах отдельных нейронов и их объединений в функциональные системы (ФС) разных уровней сложности [1, 2, 5, 6, 8]. Функциональные системы клетки, в основе которых лежат организованные молекулярные ансамбли, обеспечивают, вероятно, интегративную деятельность нейрона и поддержку адаптивных параметров в пределах физиологической нормы. Можно выделить набор мотивационных и генетических программ, адаптируемых к условиям окружающей среды обучением, обеспечивающих поддержание такой нормы (гомеостаза). Молекулярные функциональные системы в пределах клетки работают, вероятно, как комплекс регуляторных контуров, выполняющих и стабилизирующих определенную функцию. Взаимодействия в нейроне множества этих систем приводит к возникновению новых интегративных качеств, не свойственных отдельным компонентам, так называемых эмерджентных (системных) качеств и функций. Благодаря этим свойствам нервные клетки функционируют как молекулярные информационные системы, обладающие множеством свойств, лежащих в основе когнитивности.

Основная проблема, при попытках создания концептуальных моделей нейрона, заключена в выборе базового уровня организации клеток, начиная с которого детализация должна быть достаточно полной. Существующий уровень знаний не позволяет четко провести такую границу. Фрагментарность знаний о молекулярной организации функциональных системах, нейронов сейчас по-

зволяют создавать в основном гипотетические схемы [4, 5].

Созданная, в рамках этой работы, на основе теоретико-экспериментального анализа структурно-функциональная схема нервной клетки как базового элемента когнитивных систем предполагает активный характер нейрона. Клетка осуществляет поиск информации о внешней среде путем модификации и создания сенсорных структур, основных мотивационных подпрограмм, обладающих как фиксированными, так и модифицируемыми и запоминаемыми алгоритмами реагирования на внешние воздействия. Нейрон содержит блоки сравнения текущего внутреннего и внешнего состояний, принятия решений и их исполнения эффекторами.

Структурно-функциональная схема нейрона

В составе нейрона, можно выделить и ряд функциональных систем. Однако литературных данных по многим из них недостаточно для построения подробной молекулярной сигнальной сети. В целом иерархия молекулярных функциональных систем, автономных регуляторных контуров и составляет надмолекулярную функциональную систему – нейрон. Актуальной задачей представляется создание структурно-функциональной схемы нейрона, учитывающей современные данные. Показано, что изолированные нейроны *in vitro* способны к осуществлению достаточно сложного когнитивноподобного “поведения”- запоминанию и распознаванию образов сигналов, предсказанию возможных изменений внешних условий и выбору реакции предотвращающей их последствия [6].

При этом нервная клетка проявляет свойства подобные свойствам, как многоклеточных биологических систем, так и одноклеточных. Ее “поведение”, в достаточной степени, автономно и организм для нейрона выступает в качестве внешней среды. “Поведение” нейрона формируемое на основе генетических программ подстраивается под свойства этой среды обучением в процессе жизнедеятельности [11]. Главной, генетически предопределенной программой является поддержание функционального состояния клетки, ее гомеостаза [12–15]. Реализация программы поддержания гомеостаза нейрона осуществляется на основе мотивационных подпрограмм. У нейрона, как и аналогичных программ других организмов, основными подпрограммами могут являться: создание новых информационных входов, алгоритмов реакций на основе ассоциаций сигналов и предсказание будущих сигналов (познавательная мотивация); оценка и поддержание энерго-материальных ресурсов (пищевая); избегание неблагоприятных условий, сигналов (оборонительная); сохранения, восстановления целостности, репарация повреждений [16, 17]. Сравнение сигналов, формируемых такой внутриклеточной молекулярной информационной системой, с данными из памяти (разноуровневой, распределенной в каждой из этих систем и в геноме) с сигналами, поступающими из внешней (для клетки) среды, приводят к классификации, определению степени новизны этих сигналов. В случае опознания сигнала подключается система предсказания последствий и реагирования на основе генетически предопределенных и возникших при обучении алгоритмов. Анализ (сравнение с образами в памяти) приводит к включению различных программ ответа как целостного поведенческого акта, определяемых результатами сравнения.

Молекулярной основой такой функциональной схемы, вероятно, являются внутриклеточные молекулярные ансамбли, цитоскелет, действующие как ассоциативная память. Показано, что дипольная система цитоскелета [4, 7] может осуществлять распознавание образов и на основе этого реализовывать управление эффекторами. Если в памяти системы хранятся прототипы образов, а системе предъявляется образ, описываемый начальным вектором, то происходит превращение начального образа в ближайший к нему прототип. Осуществляться такая процедура, вероятно, может благодаря определяемой структурно-функциональной матрицей динамике волны распространения сигнала от одного к другому элементу клетки. Активизация в результате распознавания вектора включенных в него эффекторных элементов клетки может приводить к формированию ответа, позволяющего избежать или минимизировать внешние воздействия как за счет изменения внутриклеточных систем, так и за счет изменения внешней среды, вызванные нейрональной реакцией. Рост отростков, образование и актуализация межклеточных связей для конкретного нейрона в нейрональной сети так же меняет его внешнюю среду.

Для приближения к созданию функциональной схемы когнитивных систем представляется целесообразным интегрировать предпринимавшиеся ранее попытки создания подобных схем. Наиболее интересные и близкие к существующим экспериментальным данным, на наш взгляд, предлагались при создании функциональных систем [2], когнитивного модуля [8, 18], автономных адаптивных агентов [5].

На основе таких теоретико-экспериментальных работ, включая наши, предпринята попытка создания концептуальной, гипотетической функциональной схемы нейрона как системы, обладающей элементами когнитивности.

Заключение

Анализ работы клетки, как молекулярной функциональной информационной системы, элементы которой взаимодействуют в широком временном и пространственном диапазоне, дает представление о процессах возникновения интегративных качеств, ассоциированных с понятиями когнитивности, на уровне нервной клетки. Использование концептуальной модели нейрона, которая учитывает его основные свойства, при разработке

имитационных систем, возможно, приблизит их функциональные возможности к свойствам биологических прототипов, и создаст предпосылки к решению задач медицинской коррекции патологических состояний при когнитивных расстройствах. Высказанные предположения, естественно, нуждаются в дальнейшем теоретико-экспериментальном анализе и требуют развития концептуальных моделей биологических информационных систем.

Работа выполнена при поддержке базового проекта фундаментальных исследований РАН 35.1.5, интеграционных проектов Президиума СО РАН 108, 136, гранта РФФИ 12-01-00639.

Литература

1. *Брежестовский П.Д.* Физиология синапса: от молекулярных модулей до ретроградной модуляции // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2010. 96(9): 841-860.

2. *Anokhin P.K.* Systems analysis of the integrative activity of the neuron. // Pavlov J. Biol. Sci. 1974. 19(2): 43–101.

3. *Barbosa-Morais N.L., Irimia M., Pan Q., Xiong H.Y. et al.* The evolutionary landscape of alternative splicing in vertebrate species. // Science. 2012. 338(6114): 1587–1593.

4. *Craddock T.J.A., Tuszynski J.A. Hameroff S.* Cytoskeletal signaling: is memory encoded in microtubule lattices by CaMKII phosphorylation? // PLoS Comput. Biol. 2012. 8(3):e1002421.

5. *Red'ko V.G, Mosalov O.P., Prokhorov D.V.* A model of evolution and learning. // Neural Network. 2005. 18(5-6):738–745.

6. Ratushnyak A.S., Zapara T.A. Principles of cellular-molecular mech-anisms underlying neuron functions. // J. Integr. Neurosci. 2009. 8(4): 453–469.

7. *Slyadnikov E.E.* Physical grounds and models of pattern representation and recognition in a neuron cytoskeleton microtubule. // Technical Physics. 2011. 56:1699–1

8. *Яхно В.Г.* Динамика нейроноподобных моделей и процессы «сознания» // VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Нейроинформатика-2006» : лекции по нейроинформатике. М. : МИФИ, 2006. С. 88–111.

9. *Lin L. et al.* Evolution of alternative splicing in primate brain transcriptomes // Human mol. gen. 2010. V. 19. P. 2958–2973.

10. *Andrew C.P. et al.* Activity-Mediated AMPA Receptor Remodeling, Driven by Alternative Splicing in the Ligand-Binding Domain // Neuron. 2012. V. 76. P. 503–510.

11. *Fuster J. M.* Cortex and Memory: Emergence of a New Paradigm // J. Cognitive Neurosci. 2009. V. 21. P. 2047–2072.

12. *Hou Q., Man H.Y.* Input-specific homeostatic regulation of AMPA receptor accumulation at central synapses. // Comm. Integ. Boil. 2012. V. 5. P. 553–556.

13. *Davis G.W.* Homeostatic control of neural activity: from phenomenology to molecular design // Annual Rev. Neurosci. 2006. V. 29. P. 307–323.

14. *Marder E., Goaillard J.M.* Variability, compensation and homeostasis in neuron and network function // Nature Rev. Neurosci. 2006. V. 7. P. 563–574.

15. *Hou Q., Gilber, J., Man H.Y.* Homeostatic regulation of AMPA receptor trafficking and degradation by light-controlled single-synaptic activation // Neuron. 2011. V. 72. P. 806–818.

16. *Koninck P.D., Schulman H.* Sensitivity of CaM kinase II to the frequency of Ca oscillations // Science. 1998. V. 279. P. 227–230.

17. *Potter W.B. et al.* Metabolic regulation of neuronal plasticity by the energy sensor AMPK // PLoS One. 2010. 5. e8996

18. *Яхно В.Г.* Модели «адаптивных распознающих ячеек» для формализованного описания психологических реакций человека // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2010. № 2. С. 11–16.

О мировоззренческих аспектах естественнонаучных исследований когнитивных процессов

В.Ф. Пряхин

Российский государственный гуманитарный университет, Москва
pryakhin2010@mail.ru

В современной науке достаточно широко признанным является мнение о том, что человечество вступило в эру кардинальных перемен. Эти перемены связаны с глобализацией и возникновением целого ряда проблем, угрожающих самому существованию земной цивилизации [1–4 и др.]. В наиболее общей форме они получили название глобального кризиса современной цивилизации, которым мы и будем пользоваться

Общепринятого обозначения причин глобального кризиса нет. Но одним из наиболее обоснованных толкований является их понимание как следствия рокового отставания в общественном осмыслении достижений научно-технического прогресса. Основоположник отечественного человековедения академик И.Т. Фролов писал, в частности, что это отставание «нашло свое выражение в том, что сегодня принято называть технократическими перекосами», требующими анализа с социальной, культурной, человеческой, гуманистической точек зрения любого сколько-нибудь серьезного научно-технического или инженерно-технологического проекта до его реализации [5].

В этой связи особого внимания заслуживает мировоззренческое осмысление научных исследований и опытно-конструкторских разработок в области когнитивных процессов и бионики. В весьма близкой перспективе возможно достижение полного понимания процессов высшей нервной деятельности и моделирование функций головного мозга человека [6]. Это откроет прямую дорогу к моделированию человеческой личности. Значение этой перспективы еще далеко от мировоззренческого осмысления, но в военно-прикладном плане моделирование функций человеческого мозга, в частности в США [7], идет полным ходом. Человечество только чуть-чуть отступило от роковой черты ядерной войны, но милитаризация биокибернетических научных исследований и их распространения по всему миру чревата возникновением еще более серьезных угроз для выживания человечества.

В политологическом плане осмысление последствий научно-технического прогресса в целом и в бионике в частности однозначно ведет к признанию очевидной необходимости увеличения глобальной управляемости миром при полном уважении центральной и координирующей роли ООН [8]. Практическая реализация этой аксиоматической задачи осложняется, однако, продолжающимся политическим, военно-стратегическим и экономическим соперничеством, углублением цивилизационного разлома, социальной, этнической и конфессиональной разобщенности современного мира. Рассматривая возможные опции развития этих тенденций, приходится признать, что их негативный вариант чреват новым еще более опасным рецидивом «холодной войны» со всеми вытекающими последствиями, позитивный же может означать принятие международным сообществом любого даже наименее приемлемого (диктаторского) варианта мирового правительства как единственной альтернативы глобальной катастрофе. Трансгуманисты прогнозируют эту альтернативу примерно на конец первой половины XXI века по достижении некоего предела технологического развития цивилизации, обозначаемого условно как точка сингулярности [9].

Философское осмысление исследований в области формализованного описания когнитивных процессов сулит интересный выход из политологического тупика, создаваемого новым витком информационно-коммуникационной революции. Как представляется, этот выход открывает концепция качественного скачка в эволюции гомо сапиенс как биологического вида и его трансформацию в новый материальный носитель разума или новую форму движения материи [10]. Один из главных представителей экзистенциализма, видный немецкий философ К. Ясперс, считал такой качественный скачок непременным условием выживания человечества [11]. Такая постановка вопроса вытекает из самой логики познания. С проникновением человека в глубины макро- и микрокосмоса возникла необходимость анализирования процессов, продолжительность протекания которых исчисляется временными категориями, не постижимыми для современного человек. Гомо сапиенс есть средство материи познать самое себя на уровне мезокосмоса, микро- и макрокосмос требуют исследователя с соответствующими пространственными и временными характеристиками.

Но ни один качественный скачок в развитии цивилизации (тем более такой качественный, как изменение гомо сапиенс как вида) не может быть осуществлен без качественно новой организации общества и международного сообщества в целом. Такая организация может быть создана только тогда, когда необходимость ее создания овладеет подавляющим большинством людей, т.е. при наличии соответствующей универсальной всеобщей мировой идеологии.

Создание универсальной мировой идеологии представляется возможным на основе предложенного основоположником мировоззренческого направления русского космизма К.Э. Циолковским толкования религии как фольклорной концепции научно-технического прогресса, а общих для всех

конфессий сакральных понятий (бессмертие, воскрешение) как задач прикладной науки [12].

Исследование когнитивных процессов – область познания, наиболее близкая к решению обозначенной К.Э. Циолковским задачи поработать над «общепринятыми во всех религиях символами», «глубоко, полнее расшифровать их с космической точки зрения» [12].

Еще в начале 60-х гг. прошлого века, когда в отечественной науке впервые появилась возможность обсуждать сокровенные темы сущности жизни и бытия, академик А.Н. Колмогоров сделал революционный для своего времени вывод о том, что «моделирование способа организации материальной системы не может заключаться ни в чем ином, как в создании из других материальных элементов новой системы, обладающей в существенных чертах той же организацией, как и система моделируемая. Поэтому достаточно полная модель живого существа по справедливости должна называться живым существом, модель мыслящего существа – мыслящим существом» (курсив А.Н. Колмогорова) [13].

Полвека, истекшие со времени, когда основателем научных школ по теории вероятности и теории функций был дан этот прогноз, прошли под знаком беспрецедентной в истории научно-технической (информационно-коммуникационной) революции. В наши дни мощность компьютеров удваивается каждые одиннадцать месяцев [14], и уже скоро мы достигнем точки, когда информационная мощность одного компьютера будет равна суммарной информационной насыщенности мозгов всего человечества. Эти возможности позволят реально решать задачу моделирования мыслящего существа и человеческой личности, не только в общем виде, о чем говорил А.Н. Колмогоров, но и в конкретном применении к каждому данному индивиду. Неким прототипом решения этой задачи является идея создания цифрового двойника человека (self-developed digital image), предложенная кандидатом технических наук А.С. Мартыновым [15]. Иными словами, в перспективе при наличии достаточной информации о человеческой индивидуальности возможно ее постлетальное воспроизведение в модели, весьма близкой к оригиналу. Таким образом, подтверждается прогноз К.Э. Циолковского о том, что религиозный символ «воскрешения» становится реально выполнимым проектом прикладной науки.

Мировоззренческое значение этой перспективы когнитивных исследований трудно переоценить. Возможность обрести новую плоть в модели создает глобальную заинтересованность всех людей на Земле в продолжении жизни на ней и накоплении о себе должного объема позитивной информации. (Информация может быть и негативной, как геростратова слава, но она не дает этического права на ресуррекционное моделирование).

Такое мировоззрение позволяет объединить людей независимо от их расовой, национальной, социальной или какой-либо другой принадлежности. Толкование религиозных символов как задач прикладной науки отнюдь не противоречит конфессиональным убеждениям паствы и авторитету клира. Наоборот, оно открывает дорогу для давно назревших реформационных изменений в деятельности современных конфессий. О необходимости этих изменений как об учреждении механизмов внехрамовой литургии говорится в учении об «общем деле» человечества наставника К.Э. Циолковского, выдающегося отечественного мыслителя и религиозного философа Н.Ф. Федорова [16]. Вся логика развития религии как особой формы общественного сознания свидетельствует о том, что она постоянно идет от веры в каноническую потустороннюю силу к осознанию человеком самого себя как некоего транспортного средства для путешествия духа во Вселенной. Процесс этот запрограммирован в Библии, ибо сказал Иисус ученикам своим: «Царствие Божие внутрь вас есть» [17].

Заметим также, что в чисто прикладном политологическом плане мировоззрение, основанное на осмыслении перспектив исследований когнитивных процессов, может быть реальной и действенной альтернативной насаждаемой повсеместно разрушительной идеологии международного терроризма. Вопрос о необходимости разработки основ такой идеологии все более остро ставится практическими работниками, в частности на Северном Кавказе председателем комитета по законодательству, законности и местному самоуправлению парламента Республики Северная Осетия-Алания В.С. Гизоевым [18].

В Древнем Египте синтез науки и религии воплощали жрецы, которые одновременно были и служителями культа, и учеными-астрономами, вычислявшими периоды разлива Нила. В современном мире исследователи когнитивных процессов являются жрецами новой идеологии всемирного объединения, а их лаборатории центрами внехрамовой литургии. Они призваны обеспечить обновленную веру человека в смысл своего существования, в бессмертие и рукотворное воскрешение посредством рациональных научных исследований.

Литература

1. Россия в системе международных отношений ближайшего десятилетия : Доклад по итогам прогностического исследования, проведенного в рамках инициативного научного проекта при финансировании Российским фондом фундаментальных исследований. / Институт мировой экономики и международных отношений Российской Академии наук. М., 1995.
2. *Nick Bostrom*, PhD, Existential Risks. Analyzing Human Extinction Scenarios and Related Hazards. // Journal of Evolution and Technology, Vol. 9, March 2002. First version: 2001.
3. *Иванов А.Н.,* Угроза разрушения биологической основы человека как глобальная проблема // Вестник ОГУ, 2005, № 5.
4. *Guénon R.,* La Crise du monde modern, Paris, Folio, 1994.

5. Введение в философию: Учеб. пособие для вузов / Авт. колл. : Фролов И.Т. и др. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Республика, 2003.

6. *Hopfield J.J.,* Neurodynamics of mental exploration // Proc Natl Acad Sci USA. 2010 Jan 26; 107(4):1648-53. doi: 10.1073/pnas.0913991107. Epub 2009 Dec 30.

7. Американское агентство DARPA испытало солдат-роботов. Интернет-портал Института информационных технологий г. Екатеринбурга, Новости, 29.01.2013, интернет ресурс:
http://www.nakanune.ru/news/2013/1/29/22298778/

8. Концепция внешней политики Российской Федерации, Утверждена Президентом Российской Федерации В.В. Путиным 12 февраля 2013 г, интернет ресурс:
http://www.mid.ru/brp_4.nsf/newsline/6D84DDEDEDBF7DA644257B160051BF7F

9. *Турчин В.Ф.,* Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции, изд. 2-е. М. : ЭТС, 2000.

10. *Пряхин В.Ф.* Место проблемы искусственного увеличения видовой продолжительности жизни в марксистской классификации наук. // Искусственное увеличение видовой продолжительности жизни: 2-й симпозиум. / академик Н.П. Дубинин (ред.). М., 1980; Тезисы докладов. М.: Наука, 1980, с. 44. English version was republished by Herman Le Compte in his “Rejuvenation” magazine, see: Pryakhin V.F., The place of the problem of the artificial prolongation of the specific lifespan in the Marxist classification of sciences, In: Rejuvenation, Official Journal of the International Association of the Artificial Prolongation of the Human Specific Lifespan, April 1982, Vol. X, No 2, p. 39.

11. *Jaspers K.,* Philosophie und Welt. München, 1963.

12. *Циолковский К.Э.* Грезы о Земле и небе: Научно-фантастические произведения.. Тула: Приокское книжное издательство, 1986.

13. *Колмогоров А.Н.* Жизнь и мышление как особые формы существования материи. // О сущности жизни. М. : Наука, 1964.

14. *Константинов А.* Футурологи готовятся к глобальной трансформации человечества // Русский репортер. 25 апреля 2012. №16 (245), интернет-ресурс: http://rusrep.ru/article/2012/04/25/singulyarnost.

15. *Писаренко Д.* Вечный человек // Аргументы и факты. № 27 (1184) от 2 июля 2003; интернет-ресурс: http://gazeta.aif.ru/_/online/aif/1184/23_01

16. *Федоров Н.Ф.* Философия общего дела: Статьи, мысли и письма. / Под ред. В.А. Кожевникова и Н.П. Петерсона. Т. 1. Верный, 1906.

17. Евангелие от Луки, глава 17, стих 21. Библия или книги Священного писания Ветхого и Нового Завета в русском переводе с параллельными текстами. Издание одиннадцатое. Стокгольм : Общество распространения Евангелия в России, 1946.

18. Победить терроризм без соответствующей идеологии невозможно // Осетия сегодня. 2010. 11 июня.

Влияние прослушивания музыки на динамику показателей вариабельности сердечного ритма

Г.С. Радченко, А.А. Дуденков

Нижегородский государственный университет им. Лобачевского,
radchenko.grigoriy@mail.ru

Музыка и отдельные ее элементы активно используются в системах с биологической обратной связью, в интерфейсах мозг – компьютер и в различных программах психологической реабилитации [2; 4; 5]. К сожалению, на сегодняшний день недостаточно изучено влияние музыки на психофизиологическое состояние человека, и до сих пор отсутствуют объективные показатели, позволяющие прогнозировать результат прослушивания определенным человеком в конкретном состоянии отдельного музыкального произведения. Было проведено исследование изменения показателей вариабельности сердечного ритма во время прослушивания классического музыкального произведения. Мы предполагаем, что результат влияния музыки и ее отдельных компонентов может быть связан с исходными параметрами вегетативной регуляции и исходным психологическим состоянием и что учет этих параметров при прогнозировании воздействия музыки поможет более эффективной работе в областях, использующих музыку как средство коррекции.

Процедура и методы исследования. Для регистрации сердечного ритма использовались аппаратно-программные комплексы ЭЭГА-21/26 «Энцефалан-131-03» и Нейрософт «ВНС Микро».

Для оценки типа вегетативной регуляции использовался метод кардиоинтервалографии. С помощью быстрого преобразования Фурье рассчитывался спектр мощности колебаний продолжительности *R–R*-интервалов. Расчет параметров частотной компоненты спектра проводился в соответствии со стандартами Европейского Кардиологического общества и Северо-Американского общества стимуляции и электрофизиологии [3].

Для анализа были использованы следующие спектры частот:

1) Высокие частоты (High Frequency – HF): 0,15 – 0,40 Гц. Мощность данного диапазона свидетельствует об активности парасимпатической нервной системы.

2) Низкие частоты (Low Frequency – LF): 0,04 – 0,15 Гц. Мощность этого диапазона является маркером активации симпатической нервной системы.

3) Очень низкие частоты (Very Low Frequency – VLF) – 0,003 – 0,04 Гц. Мощность данного диапазона связывают с гуморальной регуляцией.

Вычислялся коэффициент симпатико-парасимпатического баланса LF/HF. Рассчитывался долевой вклад каждого компонента спектра в общую структуру.

Для оценки психологического состояния использовалась методика оперативной оценки самочувствия, активности и настроения (САН). Для анализа использовались все показатели методики («самочувствие», «активность», «настроение»), а также показатели изменений этих значений между заполнениями методики. Статистическая обработка велась при помощи программ Microsoft Office Excel 2010 и Statistica 6.1, вычислялись коэффициенты корреляции по Спирмену и *t*-критерий Стьюдента для зависимых и независимых выборок.

Запись электрокардиограммы осуществлялась в положении сидя и состояла из трех проб: во время первой регистрировалась фоновая ЭКГ для определения исходного типа вегетативной регуляции, во время второй испытуемым в наушники предъявлялся отрывок музыкального произведения, во время третьей регистрировалась фоновая ЭКГ для определения типа вегетативной регуляции после прослушивания музыкального произведения. Продолжительность всех фоновых проб – 3 минуты. До и после регистрации ЭКГ испытуемым предлагалось заполнить бланк методики САН. В качестве стимульного материала использовался отрывок из музыкального произведения Рихарда Вагнера «Полет Валькирии» и отрывок из музыкального произведения Иоганна Себастьяна Баха «Концерт для фортепиано фа-минор. Соч. 2». По совокупности средств музыкальной выразительности произведение Рихарда Вагнера относится к эрготропным (на психологическом уровне способствует эмоциональному подъему, на физиологическом – общей активации, выражающейся в повышении артериального давления, учащении дыхания и пульса), а произведение Иоганна Себастьяна Баха – к трофотропным (способствует спокойствию на психологическом уровне, и общему снижению напряжения на физиологическом) [1].

В исследовании приняли участие 52 добровольца обоего пола, в возрасте от 17 до 25 лет. На основании оценки типа вегетативной регуляции по первой фоновой записи ЭКГ испытуемые были разделены на четыре группы: симпатотоников, прослушавших эрготропную музыку (15 чел.), ваготоников, прослушавших эрготропную музыку (13 чел.), симпатотоников, прослушавших трофотропную музыку (12 чел.), и ваготоников, прослушавших трофотропную музыку (12 чел.). На основании изменения типа вегетативной регуляции после прослушивания испытуемые были разделены на четыре подгруппы: ваготоники с изменениями типа вегетативной регуляции и без его изменения и симпатотоники с изменениями и без изменения типа вегетативной регуляции. Дальнейший анализ проводился внутри этих подгрупп. В контрольной группе в качестве испытуемых приняло участие 30 добровольцев обоего пола в

возрасте от 17 до 26 лет. На основании оценки типа вегетативной регуляции по первой фоновой записи ЭКГ испытуемые также были разделены на две группы: симпатотоников (12 чел.) и ваготоников (18 чел.). Дальнейший анализ этих групп проводился аналогично экспериментальной выборке.

Результаты исследования. У ваготоников, прослушавших эрготропное музыкальное произведение, были выявлены достоверные различия по показателю «самочувствие» (p = 0,05) до и после прослушивания музыки. Схожая тенденция наблюдалась и для показателя «настроение», где получены результаты близкие к достоверному различию (p = 0,08).

Для выборок, изменивших исходный тип вегетативной регуляции после прослушивания эрготропного музыкального произведения, были получены следующие результаты: у испытуемых прослушавших музыкальное произведение, были выявлены достоверные различия (p = 0,05) между параметрами «настроение» до и после прослушивания; у ваготоников, изменивших тип вегетативной регуляции после прослушивания, эти различия были более выражены (p = 0,02). Показано достоверное различие (p = 0,03) по параметру «настроение» между выборкой ваготоников, изменивших тип вегетативной регуляции после прослушивания, и выборкой ваготоников, сохранившей исходный тип. Это позволяет предположить наличие взаимосвязей типа вегетативной регуляции и динамики спектра вариабельности сердечного ритма с показателем «настроение» по методике САН. Выявлены достоверные различия (p = 0,02) по параметру «исходного самочувствия» для выборок ваготоников и симпатотоников.

По результатам анализа вариабельности сердечного ритма были выявлены достоверные различия (p = 0,03) устойчивости изменения типа вегетативной регуляции после прослушивания эрготропного музыкального произведения, показано, что для ваготоников изменения типа вегетативной регуляции во время и после прослушивания более устойчивы. Показано, что исходный тип вегетативной регуляции значительно влияет на динамику VLF-компоненты в спектре вариабельности сердечного ритма: у 58% симпатотоников происходит увеличение мощности, а у 76% ваготоников – уменьшение. В группах симпатотоников и ваготоников, прослушавших эрготропное музыкальное произведение, выявлено достоверное различие в исходной структуре спектра вариабельности между подгруппами с реакцией инверсии и подгруппами, сохранившими исходный тип вегетативной регуляции (рис. 1).

У симпатотоников, прослушавших эрготропное произведение, достоверно различается доля HF-компонента: для подгруппы с инверсией характерно преобладание HF-компонента в общей структуре спектра вариабельности. Для ваготоников характерно преобладание HF-компонента для группы, сохранившей исходный тип вегетативной регуляции.

В выборках ваготоников и симпатотоников, прослушавших трофотропное музыкальное произведение, отмечается положительная динамика параметров по методике САН. В выборке симпатотоников, прослушавших трофотропное музыкальное произведение, характерна меньшая устойчивость типа вегетативной регуляции.

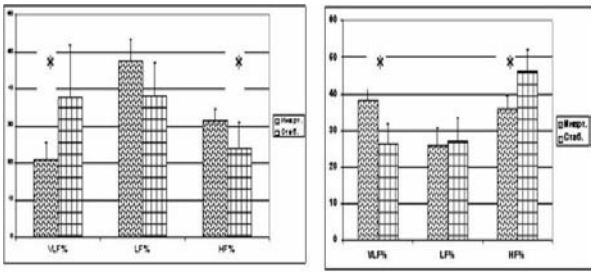


Рис. 1. Связь между исходным типом вегетативной регуляции и реакцией на прослушивание эрготропного музыкального произведения. Звёздочками обозначены достоверные различия

Сравнение экспериментальной и контрольной групп с исходной ваготонией выявило различия в долевом распределении HF-компонента во время (p = 0,01) и после (p = 0,03) экспериментального воздействия. Это позволяет предположить, что динамика долевого вклада этого компонента для испытуемых с исходным парасимпатическим типом вегетативной регуляции зависит от процедуры воздействия (ожидание прослушивания, прослушивание музыкального произведения).

Выводы. Ваготоники в большей степени подвержены изменению типа вегетативной регуляции при прослушивании эрготропного музыкального произведения, и данные изменения носят у них более устойчивый характер. Схожая динамика наблюдается у симпатотоников, прослушавших трофотропное музыкальное произведение. На результат прослушивания музыкального произведения влияют такие параметры, как исходная структура спектра вариабельности сердечного ритма и исходный уровень вегетативного баланса. Для оценки степени ваготонии или симпатотонии в едином масштабе предложен показатель уровня вегетативного баланса: УВБ = lg LF/HF (отрицательные значения показывают уровень ваготонии, положительные – симпатотонии).

Литература

1. *Декер-Фойгт Г.-Г.* Введение в музыкотерапию; пер. с нем. О. Гофман. СПб. – Питер, 2003
2. *Федотчев А.И., Судовцов В.Е.* Современные возможности и подходы к активизации познавательной деятельности человека : Учебно-методическое пособие. М. : ИРДПО, 2009. 75 с.
3. Heart rate variability. Standarts of Mesurement, Physiological Interpritation and Clinical Use // Circulation. 1996. V. 93, No 5, p. 1043.
4. *Suzanne B. Hanser.* From Ancient to Integrative Medicine: Models for Music Therapy Music and Medicine 2009. 1: 87–96.
5. Wu D, Li C-Y, Yao D-Z, 2009 Scale-Free Music of the Brain. PLoS ONE 4(6): e5915. doi:10.1371/journal.pone.0005915

Моделирование когнитивной эволюции: заделы, первые результаты, перспективы

В.Г. Редько

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва
vgredko@gmail.com

В настоящей работе обсуждается новое интересное направление исследований – моделирование когнитивной эволюции, т. е. эволюции познавательных способностей биологических организмов, приведшей к происхождению мышления человека. Актуальность исследований когнитивной эволюции связана с глубокой гносеологической проблемой: почему формальное логическое человеческое мышление, казалось бы, совсем не связанное с реальным физическим миром, применимо к познанию природы? Подробнее об этой проблеме см. [1]. В данной работе характеризуются заделы, первые результаты и перспективы исследований когнитивной эволюции. Очертим направления, в которых развиваются заделы моделирования когнитивной эволюции.

1. Заделы моделирования когнитивной эволюции

Адаптивное поведение. Направление «Адаптивное поведение» развивается с начала 1990-х годов [2]. Основной подход направления – конструирование и исследование искусственных «организмов» (в виде компьютерной программы или робота), способных приспосабливаться к внешней среде. Эти организмы часто называются «анимата́ми» (от англ. animal и robot: animal + robot = animat), агентами, автономными агентами. Исследователи адаптивного поведения разрабатывают такие модели, которые применимы к описанию поведения как реального животного, так и искусственного анимата. Дальняя цель этих работ – анализ эволюции когнитивных способностей животных и происхождения интеллекта человека. Эта цель близка к задаче моделирования когнитивной эволюции.

Искусственная жизнь. Близким направлением к «Адаптивному поведению» является интересное направление исследований «Искусственная жизнь». Основной мотивацией исследований искусственной жизни служит желание понять и промоделировать формальные принципы организации биологической жизни. Как сказал руководитель первой международной конференции по искусственной жизни К. Лангтон, «основное предположение искусственной жизни состоит в том, что "логическая форма" организма может быть отделена от материальной основы его конструкции».

Сторонники направления «Искусственная жизнь» часто считают, что они исследуют более общие формы жизни, чем те, которые существуют на Земле. То есть изучается жизнь, какой она могла бы в принципе быть («life-as-it-could-be»), а не обязательно та жизнь, какой мы ее знаем («life-as-we-know-it»). Обзор ранних работ по искусственной жизни содержится в [3].

Когнитивные архитектуры. Под когнитивными архитектурами понимаются структуры и принципы функционирования познающих систем, которые можно использовать в искусственном интеллекте [4]. Пример когнитивной архитектуры – система Soar (от англ. State, Operator and Result) [5]. Основная цель работ по Soar – создание системы функционирования интеллектуальных агентов, работающих в широкой области: от простейших форм до оперирования в сложных, заранее не предсказуемых условиях. Систему Soar предложили специалисты в области искусственного интеллекта еще в 1980-х годах, тогда ее инициировали, как попытку построить унифицированную теорию познания. В последние годы большое внимание уделяется биологически инспирированным когнитивным архитектурам [6].

Интеллектуальные автономные агенты. Это близкое к когнитивным архитектурам направление исследований, в котором большое внимание уделяется биологически обоснованным автономным агентам и компьютерным моделям агентов, обладающих когнитивными и некоторыми интеллектуальными свойствами. Обзор исследований по автономным агентам содержится в работе [7]. Необходимо подчеркнуть, что автономные агенты вполне могут рассматриваться как объединяющее понятие для указанных направлений исследований: агенты вполне естественно могут моделировать биологические организмы и искусственные аналоги организмов. Вполне естественно изучать познавательные свойства и знания автономных агентов.

Близкие работы по научным основам искусственного интеллекта. Такие работы включают исследования когнитивных систем роботов, изучение нестандартных логик, исследование познавательных методов, используемых человеком.

Биологические эксперименты по «элементарному мышлению животных». Помимо исследований в области вычислительных наук интересные работы по когнитивным способностям живых организмов ведутся биологами. В последние годы проведены интересные биологические исследования, показывающие, что элементарные формы мышления присущи не только высшим животным, но и достаточно простым, например, насекомым (пчелам, муравьям), а также врановым птицам.

Например, в университете Оксфорда проводили исследования с новокаледонскими воронами и

показали, что ворона сама, без какого-либо обучения, без каких-либо инструкций, способна изобрести способ изготовления орудия труда (см. [8] и сайт исследователей новокаледонских ворон университета Оксфорда: http://users.ox.ac.uk/~kgroup/index.html, http://users.ox.ac.uk/~kgroup/tools/ introduction.shtml.

2. Этапы будущих исследований когнитивной эволюции

Как же использовать очерченные заделы при моделировании происхождения мышления? Каковы эволюционные уровни, на которых стоит остановиться? Выделим наиболее существенные этапы, ведущие от простого поведения к логическому мышлению.

А. Моделирование адаптивного поведения автономных агентов с несколькими естественными потребностями: питания, размножения, безопасности. Это могло бы быть моделирование достаточно естественного и полноценного поведения простых модельных организмов. Моделирование в этом направлении уже начато, см. ниже.

Б. Исследование перехода от физического уровня обработки информации в нервной системе животных к уровню обобщенных образов. Такой переход можно рассматривать, как появление в «сознании» животного свойства «понятие». Обобщенные образы можно представить как мысленные аналоги наших слов, не произносимые животными, но реально используемые ими. Использование понятий приводит к существенному сокращению и требуемой памяти, и времени обработки информации, поэтому оно должно быть эволюционно выгодным.

В. Исследование процессов формирования причинных связей в памяти животных. По-видимому, запоминание причинно-следственных связей между событиями во внешней среде и адекватное использование этих связей в поведении – одно из ключевых свойств активного познания животным закономерностей внешнего мира. Естественный следующий шаг – переход от отдельных причинных связей к логическим выводам на основе уже сформировавшихся знаний.

Г. Исследование процессов формирования логических выводов в «сознании» животных. Фактически уже на базе классического условного рефлекса животные способны делать «логический вывод» такого вида: «Если имеет место условный стимул, и за условным стимулом следует безусловный, то нужно ожидать появления безусловного стимула». В определенной степени такие выводы подобны выводам математика, доказывающего теоремы [1]. И целесообразно разобраться в системах подобных выводов, понять, насколько адаптивна логика поведения животных и насколько она подобна нашей, человеческой логике.

Перечисленные пункты очерчивают круг исследований от моделирования простейших форм поведения к логическим правилам, используемым в математике. Опираясь на эти пункты, мы начали соответствующее моделирование.

3. Начальные шаги моделирования когнитивной эволюции

Компьютерная модель автономных агентов, имеющих естественные потребности. В [9] была построена и исследована компьютерная модель автономных адаптивных агентов, обладающих естественными для живых организмов потребностями: питания, безопасности и размножения. Предполагалось, что агент имеет определенный ресурс R, который уменьшался при выполнении действий и увеличивался при питании. Кроме того, ресурс агента существенно уменьшался, когда на агента нападал активный хищник. Потребностям агента соответствовали три фактора: фактор питания F_F, фактор безопасности F_S, фактор размножения F_R. Для каждого фактора имелся порог T_F, T_S и T_R, при превышении которого удовлетворялась соответствующая потребность.

Между потребностями вводилась следующая иерархия: 1) пищевая потребность (наиболее приоритетна), 2) потребность безопасности, 3) потребность размножения (наименее приоритетна). Потребность считалась ведущей, если она была наиболее приоритетной из всех потребностей, для которых фактор меньше своего порога.

Система управления агента была основана на наборе правил вида: $\boldsymbol{S}_k \rightarrow A_k$, где $\boldsymbol{S}_k$ – ситуация, A_k – действие. Ситуация $\boldsymbol{S}_k$ определялась активностью хищника рядом с агентом, предыдущим действием агента и ведущей потребностью. Агент мог выполнять одно из следующих действий A_k: 1) покой, 2) поиск пищи, 3) питание, 4) подготовка к размножению, 5) размножение, 6) оборона. Каждое правило имело свой вес W_k, веса правил настраивались методом обучения с подкреплением [10]. Подкрепления определялись изменением фактора ведущей потребности. Агент выполнял действия, соответствующие правилам с большими весами.

Моделирование показало, что в результате обучения происходит формирование циклов поведения, в которых последовательно удовлетворяются потребности питания, безопасности и размножения.

Модель формирования обобщенных эвристик и простых обобщенных образов. Формирование обобщенных эвристик и простых обобщенных образов в процессе обучения агентов при поиске агентами пищи в двумерной клеточной среде было продемонстрировано в модели [11]. Модель предполагала, что в части клеток были порции пищи. При съедании пищи ресурс агента пополнялся. Система управления агента была основана на правилах вида $\boldsymbol{S} \rightarrow A$, веса правил оптимизировались методом обучения с подкреплением.

Компьютерное моделирование показало, что при обучении агент формировал обобщающие эвристики: «Если имеется пища в той же клетке, в которой находится агент, то нужно съесть пищу»; «Если в клетке агента нет пищи, но есть пища в одной из ближайших клеток, то нужно выполнить действие или цепочку действий, направленных на движение в клетку с пищей».

Кроме этого, в компьютерную модель вводилась процедура усреднения, в результате которой агент формировал внутренние понятия «имеется пища в моей клетке», «имеется пища в клетке впереди меня», «имеется пища в клетке справа/слева от меня». Именно эти понятия использовались в обобщающих эвристиках агента.

Таким образом, построены первые модели, соответствующие выделенным этапам А и Б, хотя пока эти модели целесообразно рассматривать только как начало более полноценных исследований.

4. Междисциплинарные связи исследований когнитивной эволюции

Укажем потенциальные междисциплинарные связи будущих исследований когнитивной эволюции и тем самым подчеркнем перспективность этих исследований.

1) Эти исследования связаны с основаниями науки, с основаниями математики, с серьезной проблемой: почему логические выводы, математические доказательства применимы к реальной природе.

2) Данные исследования интересны с философской, эпистемологической точки зрения – они нацелены на прояснение причин применимости человеческого мышления в познании природы.

3) В ряде направлений исследований вычислительного интеллекта и в биологических работах развивается задел по моделированию когнитивной эволюции.

4) Эти исследования интересны с точки зрения развития когнитивных наук, так как они связаны с наиболее важными когнитивными процессами – процессами научного познания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-01-00399.

Литература

1. *Редько В.Г.* Моделирование когнитивной эволюции – перспективное направление исследований на стыке биологии и математики // Математическая биология и биоинформатика (электронный журнал). 2010. Т. 5. № 2. С. 215-229. URL: http://www.matbio.org/downloads/Redko2010(5_215).pdf

2. From Animals to Animats. Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. **(***Meyer J.-A., Wilson S.W.*, Eds.). Cambridge: MIT Press, 1991.

3. *Редько В.Г.* Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики. М. : УРСС, 2005.

4. *Langley P., Laird J.E., Rogers S.* Cognitive architectures: Researchsues and challenges // Cognitive Systems Research. 2009. V.10. No. 2. P. 141-160.

5. *Laird L.E.* The Soar Cognitive Architecture. Cambridge et al.: The MIT Press, 2012.

6. Biologically Inspired Cognitive Architectures 2012. Proceedings of the Third Annual Meeting of the BICA Society (*A. Chella, R.Pirrone, R. Sorbello, K.R. Johannsdottir,* Eds). Heidelberg et al. : Springer, 2012.

7. *Vernon D., Metta G., Sandini G.* A survey of artificial cognitive systems: Implications for the autonomous development of mental capabilities in computational agents // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2007. V. 11. No. 2. P. 151–180.

8. *Weir A.A.S., Chappell J., Kacelnik A.* Shaping of hooks in New Caledonian crows // Science. 2002. V. 297. No. 5583. P. 981–983.

9. *Коваль А.Г. Редько В.Г.* Поведение модельных организмов, обладающих естественными потребностями и мотивациями // Математическая биология и биоинформатика (электронный журнал). 2012. Т. 7. № 1. С. 266-273. URL: http://www.matbio.org/2012/Koval2012(7_266).pdf.

10. *Саттон Р.С., Барто Э.Г.* Обучение с подкреплением. М. : Бином, 2011.

11. *Бесхлебнова Г.А., Редько В.Г.* Модель формирования обобщенных понятий автономными агентами // Четвертая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов: В 2-х томах. Томск: ТГУ, 2010. Т. 1. С. 174–175.

Модель прозрачной рыночной экономики

В.Г. Редько, З.Б. Сохова

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва
vgredko@gmail.com

Построена многоагентная модель прозрачной рыночной экономики, приводятся результаты компьютерного эксперимента. Модель основана на подходе работ [1, 2], в которых использовались легкие агенты-посланники (аналоги искусственных муравьев) для оптимизации работы производственного цеха и движения автомобилей в городе. В настоящей работе легкие агенты (агенты-разведчики и агенты намерений) используются для оптимизации функционирования сообщества инвесторов и производителей.

1. Описание модели

В работе рассматривается экономическое сообщество, состоящее из инвесторов и производителей, экономические характеристики которых открыты для всего сообщества. То есть инвесторы и производители предоставляют всему сообществу информацию о собственном текущем капитале и получаемой прибыли.

Сообщество состоит из N инвесторов и M производителей, каждый из которых имеет определенный капитал K_{inv} и K_{pro}. Время t дискретно. Имеются периоды функционирования сообщества инвесторов и производителей. Например, каждый период T может быть равен одному году; T – номер периода.

В начале каждого периода T отдельный инвестор делает вклад в m производителей. В конце периода производитель возвращает каждому инвестору капитал, вложенный инвестором, а также распределяет часть полученной им прибыли между инвесторами пропорционально их вкладам.

В конце периода T каждый инвестор принимает решение, какой капитал вложить в того или иного производителя в следующий период T+1. Для принятия решения организуется описанный ниже итеративный процесс.

Если капитал инвестора или производителя стал меньше определенного малого порога Th_{min_inv} или Th_{min_pro}, то инвестор или производитель прекращает свою деятельность. Если же капитал инвестора или производителя стал больше высокого порога Th_{max_inv} или Th_{max_pro}, то такой инвестор или производитель порождает «потомка», при этом «родитель» отдает потомку половину своего капитала.

Функционирование производителей и инвесторов. Считаем, что перед началом периода T i-й производитель имеет собственный исходный капитал C_{i0}. Будем полагать, что производитель вкладывает в производство весь имеющийся у него к началу периода капитал C_i, включающий в себя вклады инвесторов:

$$C_i = C_{i0} + \sum_{j=1}^{N} C_{ij}, \qquad (1)$$

где C_{ij} – капитал, вложенный j-м инвестором в i-го производителя в начале периода. Считаем, что зависимость прибыли производителя от его текущего капитала нелинейная $Pr_i(C_i)$: прибыль мала при малом капитале C_i и достигает насыщения или очень медленно возрастает при большом C_i: $Pr_i(C_i) = k_i F(C_i)$, где функция F одинакова для всех производителей, а коэффициент k_i характеризует эффективность производства i-го производителя. Величины k_i в конце каждого периода случайно варьируются. При компьютерном моделировании считалось, что функция $F(x)$ имеет вид $F(x) = \dfrac{x^2}{x^2 + a^2}$.

В конце периода T производитель возвращает инвесторам вложенный ими капитал и выплачивает инвесторам часть полученной им прибыли. Причем j-му инвестору отдается часть прибыли, пропорциональная сделанному им вкладу в данного производителя:

$$Pr_{ij} = k_{\text{выпл}} Pr_i(C_i) \frac{C_{ij}}{\sum_{l=1}^{N} C_{il}}, \qquad (2)$$

где C_i – текущий капитал (в начале периода) i-го производителя, $k_{\text{выпл}}$ – параметр, характеризующий долю выплат прибыли инвесторам, $0 < k_{\text{выпл}} < 1$. Сам производитель получит остальную часть своей прибыли Pr_i, равную

$$Pr_i = (1 - k_{\text{выпл}}) Pr_i(C_i). \qquad (3)$$

Схема итеративного процесса принятия решения инвесторами. Итеративный процесс, в течение которого определяются вклады инвесторов в производителей, состоит в следующем.

На первой итерации инвесторы рассылают агентов-разведчиков по всем производителям и определяют, какой капитал имеется у каждого производителя в данный момент времени. Причем на первой итерации не учитываются вклады других инвесторов в производителей. j-й инвестор оценивает величину A_{ij}, характеризующую прибыль P_{ij}, ожидаемую от i-го производителя в течение следующего T+1-го периода. Величина A_{ij} равна

$$A_{ij} = k_{dij} P_{ij} = k_{dij} k_{is} k_i F(C'_{i0}) \frac{C_{ij}}{\sum_{l=1}^{N} C_{il}}, \qquad (4)$$

где C_{il} – капитал, вложенный l-м инвестором в i-го производителя, C'_{i0} – предполагаемый исходный капитал i-го производителя в начале следующего периода (пока без учета вкладов инвесторов), k_{dist} = = k_+, либо k_- , $k_+ > k_-$. Положительные параметры k_+ , k_- определяют степень доверия инвестора производителю, т. е. предполагается, что степень доверия инвестора к проверенному и непроверенному производителю равна k_+ и k_- соответственно. Эти параметры учитывают то, что инвестор предпочитает проверенных им производителей. При моделировании полагалось $k_+ = 1$, $k_- = 0{,}5$.

Затем инвестор ранжирует всех производителей в соответствии с величинами A_{ij} и выбирает m наиболее выгодных производителей, т. е. тех производителей, которым соответствуют большие величины A_{ij}. Далее j-й инвестор формирует намерение распределить весь свой капитал $K_{inv\ j}$ по всем выбранным производителям, пропорционально полученным оценкам A_{ij} (для невыбранных производителей формально полагалось $A_{ij} = 0$). А именно, намечается, что вклад j-го инвестора в i-го производителя C_{ij} будет равен

$$C_{ij} = K_{inv\ j} \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^{M} A_{ij}}. \qquad (5)$$

На второй итерации каждый инвестор с помощью агентов намерений оповещает тех производителей, которых он выбрал для инвестиций, о величине капитала, который он намеревается вложить в каждого из производителей.

На основе этих данных производители оценивают свой новый исходный капитал C'_{i0} , который они ожидают после получения капитала от всех инвесторов, т. е. у производителя формируется оценка суммы $\sum_{l=1}^{N} C_{il}$ и новая оценка своего капитала в соответствии с выражением (1).

Затем инвесторы снова высылают агентов-разведчиков всем производителям и оценивают новый капитал производителей C'_{i0} с учетом намерений других инвесторов. Делаются оценки величин A_{ij} согласно выражению (4). Далее производители ранжируются, и капитал инвестора снова предварительно распределяется пропорционально новым полученным оценкам A_{ij}. Инвесторы снова рассылают агентов намерений, для того чтобы сообщить производителям намеченные величины вкладов.

Делается достаточно большое число таких итераций, после чего итерации заканчиваются, и инвестор принимает окончательное решение, какие вложения сделать на следующий период T+1. Окончательные вклады равны величинам C_{ij} , полученным инвесторами на последней итерации.

В конце каждого периода T капиталы производителей пересчитываются с учетом амортизации (например, это может быть амортизация оборудования производителя) $K_{pro}(T+1) = k_{amr}K_{pro}(T)$, где k_{amr} – коэффициент амортизации ($0 < k_{amr} \le 1$). Аналогично учитываются расходы инвесторов (для удобства соответствующие величины будем называть коэффициентами инфляции) и пересчитывается капитал инвесторов $K_{inv}(T+1) = k_{inf} \times \times K_{inv}(T)$, где k_{inf} – коэффициент инфляции ($0 < k_{inf} \le 1$).

2. Результаты компьютерного моделирования

Описанная выше модель была реализована в виде компьютерной программы. Использовались следующие параметры расчетов: количество итераций k_{iter} = 20; пороги $Th_{max\ pro}$ = 1, $Th_{max\ inv}$ = 1, $Th_{min\ pro}$ = 0,01, $Th_{min\ inv}$ = 0,.01; максимальное количество производителей и инвесторов $N_{pro\ max}$ = = 100, N_{inv_max} = 100; начальное количество производителей и инвесторов $N_{pro\ initial}$ = 50, $N_{inv\ initial}$ = = 50; m = 100; $k_{\text{выпл}}$ = 0,3; характерная величина случайной вариации коэффициентов k_i, определяющих эффективность i-го производителя, равна Δk = 0,5; параметр функции $F(x)$, определяющей величину прибыли, был равен a = 1 или a = 10.

Величины k_i, характеризующие эффективность производителей, исходно (в начале расчета) были случайными, равномерно распределенными в интервале [0,1].

Начальные капиталы инвесторов и производителей исходно были случайными, они были равномерно распределены в интервале [0,1].

Предварительно была проверена зависимость конечного суммарного капитала производителей для типичных расчетов от числа итераций в каждом периоде. Было показано, что итеративный процесс сходится в течение 10–20 итераций. С учетом этого полагалось, что число итераций равно 20.

Основной расчет. Приведем результаты расчета, в котором нет амортизации и инфляции: k_{amr} =1, k_{inf} = 1 (рис. 1).

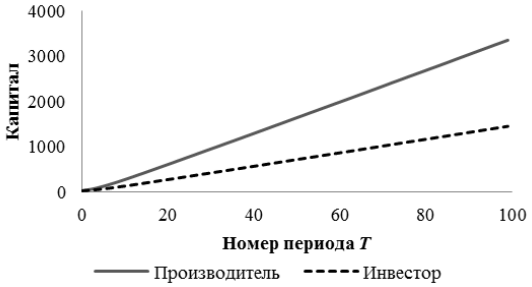


Рис. 1. Зависимость капитала инвесторов и производителей от времени (номера периода). Идеальная экономическая среда: k_{amr} = 1, k_{inf} = 1

Видно, что суммарный капитал инвесторов и производителей со временем растет.

Влияние амортизации капитала производителей и инфляции на моделируемые процессы. При умеренной амортизации и инфляции суммарный капитал производителей и инвесторов становится постоянным (рис. 2).

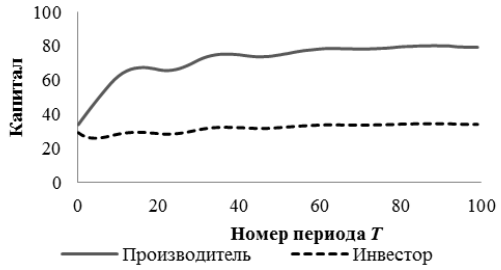


Рис. 2. Зависимость капитала инвесторов и производителей от времени. Умеренная инфляция и амортизация, $k_{amr} = 0{,}8$, $k_{inf} = 0{,}8$

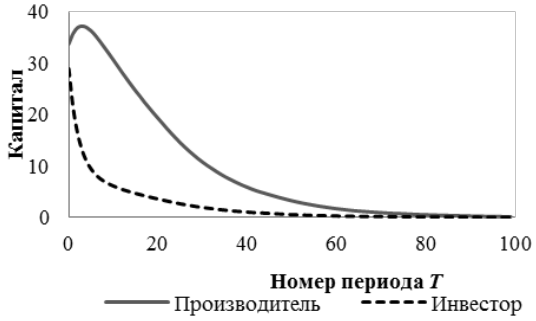


Рис. 3. Зависимость капитала инвесторов и производителей от времени, $k_{amr} = 0{,}8$, $k_{inf} = 0{,}6$

При высокой инфляции или амортизации капитал производителей и инвесторов уменьшается, и они погибают (рис. 3).

Таким образом, построена многоагентная модель прозрачной экономики. Продемонстрирована работоспособность модели и получены первые результаты компьютерных экспериментов. Построенная модель может служить опорной моделью широкого класса близких экономических процессов.

Авторы благодарны О.В. Редько за помощь в проведении компьютерных расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-01-00399.

Литература

1. *Holvoet T., Valckenaers P.* Exploiting the environment for coordinating agent intentions // Environments for Multi-Agent Systems III, Lecture Notes in Artificial Intelligence. Berlin et al.: Springer. Vol. 4389, 2007. P. 51–66.

2. *Claes R., Holvoet T., Weyns D.* A decentralized approach for anticipatory vehicle routing using delegate multiagent systems // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2011. Vol. 12. No. 2. P. 364–373.

Когнитивное моделирование на основе теории цепных процессов: инсайт

Н.А. Рубцова, Г.Г. Комиссаров

Институт химической физики РАН им. Н.Н. Семёнова, Москва
nroubtsova@yandex.ru

Известно, что интуитивное мышление может протекать либо монотонно, либо скачкообразно с некоторым периодом индукции. Аналогично этому, цепной процесс в условиях ограничения объема, в котором протекает химическая реакция, развивается либо монотонно, либо взрывообразно. В данной работе предлагается модель, объясняющая особенности динамики хода решения задач на инсайт с использованием аппарата теории цепных химических реакций Н.Н. Семенова [1]. Предпринята попытка объяснить преимущество билингвов в ходе решения интуитивных задач, т. е. их бóльшую способность к проявлению инсайта по сравнению с монолингвами на основании оптимизации условий параметров предложенной модели.

В качестве арены развития цепного процесса будем использовать принятый в когнитивной психологии образ ментальной репрезентации, а в качестве действующих акторов, или агентов, – минимальные единицы оперирования, которые подчиняются законам случайного броуновского движения.

Размеры арены могут быть соотнесены с объемом внимания в те моменты, когда построение направляется субъектом в целом. Однако чаще построение происходит как экстракция и конденсация избранных связей из потоков данных разных модальностей, и тогда под размером арены следует понимать объем оперативной памяти.

В ходе развития мыслительной цепи две единицы минимального оперирования, связавшись, способны снова контактировать с другими единицами. Другими словами, они взаимодействуют подобно свободным радикалам, образующим цепную химическую реакцию. Если в оперативном поле (на арене ментальной репрезентации) такие единицы связаны более чем с двумя партнерами, то их поведение можно рассматривать как разветвленную цепную реакцию.

Билингвами называют людей, которые с детского возраста (не позже чем с 6 лет) погружены в такую языковую среду, в которой они вынуждены одновременно активно использовать два языка. По сравнению с обычными людьми билингвы обладают разнообразными преимуществами при выполнении различных интеллектуальных заданий. У них отмечается повышенная дивергентность мышления [3], величина которой служит мерой некоторых аспектов креативности; они лучше решают задачи на инсайт [4], у них выявлен бóльший объем рабочей памяти [5]. При изучении действия отрицательного прайминга у билингвов (устойчивости к помехам при выполнении основного задания) также отмечены благоприятные отличия от монолингвичных людей [6, 7]. Однако при рассмотрении времен, которые они тратят на обработку лингвистических заданий, выясняется, что, по сравнению с монолингвами, у билингвов отмечается задержка обработки на многих лингвистических уровнях, включая распознавание слова, языковую продукцию и семантическую интеграцию. Особенно эти задержки проявляются во втором языке (распознавание слова, формулировка слова) [8].

Известно, что цепные химические реакции при определенных условиях описываются экспоненциальным законом и характеризуются бурным протеканием. Исходя из современных представлений об инсайте, как реструктуризации ментальной репрезентации, нами предложено рассматривать момент инсайта как результат резкого увеличения средней длины цепей, что соответствует цепному взрыву в теории цепных реакций Семенова [1, 2].

Возможность реструктуризации и последующего инсайта наступает при двух условиях. Во-первых, это положительная разность скорости ветвления f и гибели g цепей:

$$f - g > 0, \qquad (1)$$

а во-вторых, соотношение размера арены d (объема внимания или размера оперативной памяти, в этом приближении пока не вводится между ними различий), скорости дрейфа мыслительных единиц в пределах арены c и длины свободного пробега λ таких единиц до столкновения выраж ается следующим неравенством:

$$\frac{3(f-g)d^2}{c\lambda} \geq \pi^2 . \qquad (2)$$

Физический смысл этих условий в том, что цепи должны хорошо развиться в результате сильного ветвления и малой длины свободного пробега единиц оперирования до столкновения. Кроме того, единицы должны двигаться не слишком быстро, чтобы до столкновений не оказаться на границе арены, где происходит их гибель.

В свете предложенной нами модели на основе теории цепных реакций была предпринята попытка на примере билингвов рассмотреть ее применимость.

Действительно, если в качестве разности скоростей ветвления f и гибели цепи g выступает соотношение между степенью дивергентности мышления и устойчивостью к помехам [7, 8], то в случае билингвов мы имеем оптимальное условие (1).

Скорость лингвистической обработки у билингвов понижена по сравнению с монолингвами (аналог величины *c*). С другой стороны, оперативная память билингвов отличается хорошим объемом (большое *d*). Таким образом, и соотношение (2) у билингвов по этим двум параметрам благоприятнее, чем у монолингвов.

Преимущества билингвов можно рассмотреть также из общих представлений теории информации (без рассмотрения того, как на уровне физиологии реально развивается билингвальный аппарат).

Ранний билингв имеет в распоряжении памяти на слова, по крайней мере, вдвое бóльший набор связей, чем монолингв. Это может быть достигнуто

1) за счет резервирования второго места в рабочей памяти (в нашей модели увеличенное *d*) для каждого слова и одновременно,

2) за счет формирования в долговременной памяти в картине связей дополнительной ветки на каждое слово (подобно раздвоенному языку змеи). Если представить мышление в данный момент в виде стоп-кадра текущего графа связей, то можно увидеть, что пропускная способность для потока внутри такого билингвального графа с раздвоением выше, чем у монолингва.

При построении репрезентации, обращение к долговременной памяти – это также задача блуждания по сформированному ранее графу связей. Если в нашей модели речь идет о бóльшем *f*, о цепях с большим количеством разветвлений, то обращение к долговременной памяти никак не тормозит процесс построения репрезентации – поток идет сквозь разветвленный граф.

Дополнительное следствие того, что долговременная память билингвов также «вдвое разветвлённее», заключается в том, что эффективная длина свободного пробега минимальной единицы оперирования до столкновения λ на вдвое более разветвленном графе **укорачивается**, если засчитывать в общую длину цепи хранящиеся по парам слова. Для нашей модели это означает, что соотношение (2) благоприятнее для билингвов, чем для монолингвов и по параметру λ.

Таким образом, на основании предложенной модели можно объяснить уже имеющиеся факты, и предсказать, что билингвы будут менее чувствительны к сужению оперативной памяти *d*, чем обычные монолингвичные люди, за счет оптимальных характеристик других параметров соотношений (1) и (2).

Для того чтобы подавить интуицию билингва, нужно не только дождаться падения объема оперативной памяти, но и сильно подорвать устойчивость к помехам – увеличить *g*, либо разрушить вдвое более разветвленную систему долговременных связей, чтобы удлинить λ – а это слишком много условий. Поэтому можно предсказать, что пожилые билингвы по-прежнему будут лучше решать задачи на инсайт, чем их монолингвичные сверстники, и благоприятная разница будет увеличиваться с возрастом.

Литература

1. *Семенов Н.Н.* Избранные произведения в 4 т. М. : Наука, 2004. 391 с.

2. *Рубцова Н.А., Комиссаров Г.Г.* Цепные процессы в интуитивном решении задач: 18 Международная конференция // Математика, компьютер, образование. Вып. 18. /Пущино, 2011. С. 49.

3. *Kharkhurin A. V.* The Role of Bilingualism in Creative Performance on Divergent Thinking and Invented Alien Creatures Tests // Journal of Creative Behavior 2009. V. 43, № 1. P. 59–71.

4. *Cushen P. J. Wiley, J.* Aha! Voila! Eureka! Bilingualism and insightful problem solving // Learning and Individual Differences. 2011. V. 21, №.4. P. 458–462.

5. *Morales J., Calvo A., Bialystok E.* Working memory development in monolingual and bilingual children // *Journal of Experimental Child Psychology.* 2013. V. 114, № 2. P. 187–202.

6. *Bialystok E., Martin M. M.* Attention and inhibition in bilingual children: evidence from the dimensional change card sort task // Developmental Science. 2004. V.7, №3. P.325–339.

7. *Hernandez M., Costa A., Humphreys G.W.* Escaping capture: Bilingualism modulates distraction from working memory // Cognition. 2012. V.122, №1. P. 37–50.

8. *Coderre E. L.* Exploring the Cognitive Effects of Bilingualism: Neuroimaging Investigation of Lexical Processing, Executive Control and The Bilingual Advantage: Thesis submitted for the degree of D Ph / University of Nottingham, 2012. 280 c.

Вегетативные корреляты произвольных отображений эмоционального стресса

Е.В. Рунова[2], В.Н. Григорьева[2], А.В. Бахчина[1], С.Б. Парин[1], И.С. Шишалов[1], В.В. Кожевников[1], М.М. Некрасова[3], Д.И. Каратушина[1], К.А. Григорьева[2], С.А. Полевая[2]

[1] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2] Институт прикладной и фундаментальной медицины Нижегородской государственной медицинской академии
[3] ГУ «Нижегородский НИИ гигиены и профессиональной патологии»
S453383@mail.ru

Психический стресс играет ключевую роль в развитии множества соматических и неврологических заболеваний. Термином «стресс» принято обозначать как сильные неблагоприятные физические и/или психогенные внешне средовые воздействия, так и развивающееся под их влиянием состояние психофизиологического напряжения, исходно служащее для приспособления человека к новым условиям среды. Стресс как хроническое психофизиологическое перенапряжение может провоцировать манифестацию или обострение симптомов болезни, служить одним из факторов риска или усугублять тяжесть ее течения. Кроме того, эмоциональное перенапряжение снижает продуктивность и качество выполняемых человеком работ. Клиническими коррелятами хронического эмоционального стресса являются и пограничные нервно-психические тревожные и депрессивные расстройства, резко снижающие качество жизни людей (Александровский Ю.А., 2000).

Повседневный психический стресс служит причиной множества широко распространенных серьезных заболеваний, включая гипертоническую болезнь, инсульты, инфаркты, онкопатологию и др. Негативное влияние на здоровье оказывает прежде всего хронический эмоциональный стресс, и это влияние опосредуется сопряженными с ним неблагоприятными эндокринными, нервно-мышечными и вегетативными изменениями (Яхно Н.Н., Парфенов В.А., 2009).

Если происхождение острого психического стресса связано, прежде всего, с неожиданными негативными внешними воздействиями и жизненными переменами, то развитие хронического стресса в большей степени определяется личностными особенностями человека и недостаточностью его психологических адаптационных механизмов.

Первым шагом на пути преодоления хронического эмоционального стресса является осознание самим человеком факта пребывания в состоянии психического перенапряжения. Между тем, способность к осознанию эмоций и выражению их словами развита не у всех людей в одинаковой степени (Taylor G.J., 2000). Эмоции являются субъективным феноменом, и их диагностика зависит от способности человека адекватно осознавать и выражать их словами. В этой связи большое значение имеет определение тех индивидуальных, регистрируемых в условиях обычной жизнедеятельности физиологических маркеров, которые могли бы служить индикаторами эмоциональной дезадаптации, т. е. эмоционального перенапряжения и эмоционального истощения. Знание этих маркеров позволит своевременно предоставлять человеку обратную связь об уровне его психического напряжения, используя которую, он может временно снизить это напряжение путем переключения на физическую активность или иную деятельность. Особенно важно предоставление подобного рода обратной связи для лиц, плохо осознающих особенности своего эмоционального состояния.

В данной работе проведен поиск вегетативных коррелят субъективного уровня эмоциональной дезадаптации, на базе исследования вариабельности сердечного ритма в сочетании с проективно-вербальной методикой мониторинга субъективного уровня эмоционального напряжения.

Методы

1. Схема эксперимента. В измерениях реализуется схема параллельного контроля параметров вегетативной регуляции по показателям вариабельности сердечного ритма (ВСР), и тестирование по методике определения уровня эмоциональной дезадаптации. Измерения проводили четыре раза в день в 8.00, 12.00, 16.00 и 20.00 в условиях обычной рабочей деятельности. На первом этапе исследование проводилось на выборке 60 человек (гендерные различия не оценивались) в возрасте от 19 до 23 лет. На втором этапе было проведено индивидуальное исследование с тем же набором измерений в течение 10 дней.

Измерение ВСР производилось посредством телеметрической системы регистрации сердечного ритма. Данная система представляет собой миниатюрный датчик ZephyrBioHarness, он крепится к эластичному поясу, в который вшиты два тканевых электрода. Пояс надевается на тело человека таким образом, чтобы электроды располагались в 1-м и 2-м грудных отведениях. Размер пояса устанавливается так, чтобы испытуемому было комфортно и различные движения не влияли на положение пояса.

Пакетная передача данных от датчика к мобильному устройству производится по беспроводному протоколу Bluetooth. Реализация связи, передачи и сохранения данных производится на мобильном устройстве через специализированное

программное обеспечение «HR-Reader», которое обеспечивает on-line визуализацию регистрируемой динамики RR-интервалов для контроля чистоты и целостности записи.

Расчет и анализ показателей ВСР проводился с использованием программного комплекса «RhythmService 1.2» (фирма «Фотон-тест», Нижний Новгород).

2. Мониторинг уровня эмоциональной дезадаптации (УЭД). Участнику тестирования предлагается указать зону своего текущего состояния в круговом пространстве состояний (рис. 1). Границы пространства определены в четырех точках пересечения диагоналей с окружностью. В качестве границ заданы наборы синонимичных прилагательных, описывающих эмоции в соответствии с модальностью (положительные/отрицательные) и уровнем активности (напряжение/расслабления) по отношению к четырем базисным личностным потребностям: в безопасности; в независимости; в достижении; в единении (близости). В зависимости от положения указанной зоны определяется количество набранных человеком баллов для каждой потребности. По среднему баллу судят о степени эмоциональной дезадаптации следующим образом:

0 баллов – отсутствие эмоциональной дезадаптации (физиологическая релаксация),

1 балл – слабо выраженная эмоциональная дезадаптация (физиологическое напряжение),

2 – умеренно выраженная эмоциональная дезадаптация (патологическое напряжение),

3 – резко выраженная эмоциональная дезадаптация (патологическая релаксация). (Григорьева В.Н. и др., 2007)

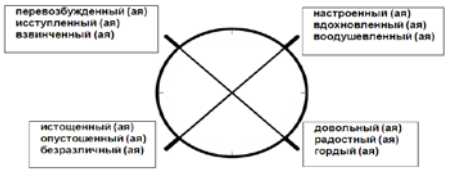


Рис. 1. Круговая шкала оценки уровня удовлетворенности по базовой потребности в достижении

3. Анализ спектральных показателей вариабельности сердечного ритма. Методы спектрального анализа позволяют выделить из сложного колебательного процесса, каковым является кардиоинтервалограмма (ритмограмма), составляющие его исходные, более простые колебания, установить их частоты, интенсивности и в некоторых случаях проследить эволюцию выявленных частотных ритмов во времени. В данной работе было использовано два метода спектрального анализа ритмограмм (РГ):

– периодограммный метод (преобразование Фурье (ПФ) и периодограмма Уэлча);

– метод непрерывного вейвлет-преобразования (НВП).

При использовании *периодограммного метода* согласно существующим методическим рекомендациям (Баевский Р.М. и др., 2001) оценивались следующие характеристики ВСР:

– TP, мс^2 – суммарная мощность спектра вариабельности сердечного ритма (обозначена на диаграммах «All»);

– VLF, мс^2 – мощность спектра ритмограмм в области очень низких частот;

– LF, мс^2 – мощность спектра ритмограмм в области низких частот;

– HF, мс^2 – мощность спектра ритмограмм в области высоких частот;

– LF/HF – соотношение мощностей спектра ритмограмм в области низких и высоких частот (коэффициент вегетативного баланса).

Метод *непрерывного вейвлет-преобразования* (НВП) использовали для анализа амплитудных модуляций спектральных компонент ритмограмм. Этот метод позволяет выделить и оценить участие высших надсегментарных регуляторных компонент в управлении сердечным ритмом.

Явление модулирования парасимпатической и симпатической активности со стороны надсегментарных структур описано в литературе (Davidson R.J., 2002; Mashin V.A., 2006). Схематически система регуляции кровообращения представлена на рис. 2. Непосредственно деятельность сердца регулируется по трем каналам: парасимпатическому, симпатическому и гуморальному. Симпатический и парасимпатический регуляторные пути формируют вазомоторный и дыхательный центры продолговатого мозга и вагус. Гуморальная регуляция осуществляется путем секреции гормонов периферическими гормональными железами. Однако все три пути регуляции испытывают регуляторное воздействие со стороны иерархически более высоко стоящих структур головного мозга (гипоталамус и кора). Именно эти структуры в нашей работе названы высшим надсегментарным звеном регуляции. Регуляторное воздействие этого звена предложено исследовать опосредованно, через его модулирующее воздействие на парасимпатический и симпатический отделы вегетативной нервной системы.

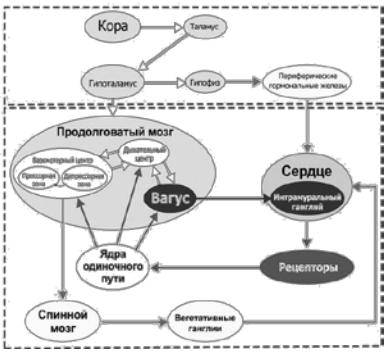


Рис. 2. Схема системы регуляции кровообращения

Метод оценки амплитудных модуляций включает следующие шаги:

1) анализ РГ методом НВП, в результате которого получали вейвлет-спектрограмму;

2) выделение на вейвлет-спектрограмме в LF- и HF-диапазонах узких полос частот (0,005 Гц), в которых рассматривали зависимости вейвлет-коэффициентов (W^2) от времени;

3) статистическая и спектральная оценка полученного временного ряда – $W^2(t)$ – (при этом дополнительным методом оценки выступал периодограммный метод).

На рис. 3 представлена ритмограмма (*а*) и вейвлет-спектрограмма (*б*) испытуемой П. На вейвлет-спектрограмме выделялись узкие полосы частот (0,005 Гц) в LF- и HF-диапазонах, в которых рассматривались зависимости вейвлет-коэффициентов (W^2) от времени (рис. 4). Полученные временные ряды характеризуют изменение мгновенной мощности данного спектрального компонента сигнала от времени. Эти зависимости можно использовать для оценки низкочастотных модулирующих воздействий.

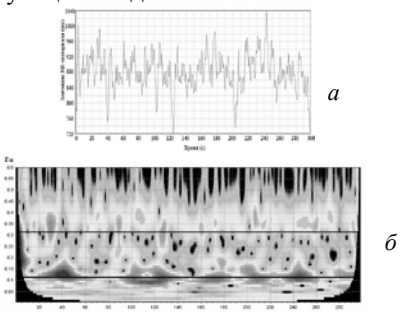


Рис. 3. Ритмограмма (*а*) и вейвлет-спектрограмма (*б*) испытуемой П. (21 год) в условиях покоя, черными линиями на вейвлет-спектрограмме отмечены полосы частот (0,005 Гц), в которых были сняты временные ряды зависимости мощности спектральных компонент сердечного ритма с центральной частотой 0,31 Гц – для HF-компоненты и 0,11 Гц – для LF-компоненты

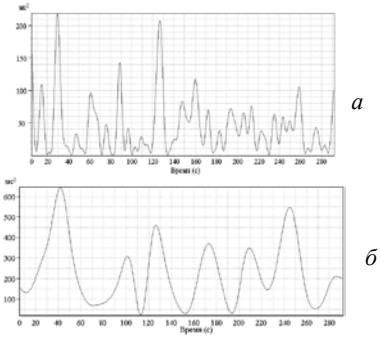


Рис. 4. Временные ряды мгновенной мощности: *а* – HF-компоненты (на частоте 0,31 Гц); *б* – LF-компоненты (на частоте 0,11 Гц)

Степень модулирующего воздействия определяли статистическим методом по разбросу временного ряда мгновенной мощности относительно среднего значения, т. е. рассчитывали среднеквадратичное отклонение (СКО).

С помощью периодограммного метода выделяли модулирующие частоты и определяли их мощность по амплитуде пиков в полученном спектре (рис. 5). Представленные спектры позволяют выделить основные модулирующие частоты – 0,03 Гц для HF-компоненты и 0,025 Гц для LF-компоненты. При этом выделяются еще несколько модуляторов (минимум один). На спектрограммах отчетливо видно, что для спектра мгновенной мощности LF-компоненты характерно более выраженное преобладание основной модулирующей частоты в спектре. По отношению общей мощности всех модулирующих частот к мощности основной модулирующей частоты рассчитывали степень концентрации мощности модулирующего воздействия около основной модулирующей частоты.

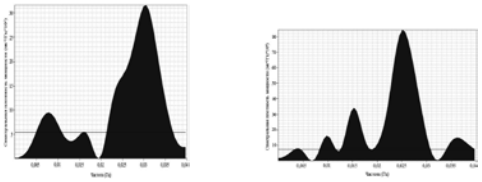


Рис. 5. Спектры Фурье временных рядов мгновенной мощности HF-компоненты (*а*) и LF-компоненты (*б*). Черной линией отмечен порог достоверности выделения сигнала из шума с вероятностью $P \geq 0.9$

Таким образом, временной ряд мощности каждой компоненты в узкой полосе частот анализируется с применением статистического и спектрального анализа. При этом исследуются характеристики непосредственно модулирующего воздействия, на основе которых получены следующие критерии оценки степени участия надсегментарного уровня в регуляции сердечной деятельности (спектральные характеристики II порядка):

– показатель степени модуляции симпатической активности – определяется по разбросу (средне-квадратичному отклонению СКО) временного ряда мгновенной мощности LF-диапазона;

– показатель степени модуляции парасимпатической активности – СКО временного ряда мгновенной мощности HF-диапазона;

– степень концентрации мощности модулирующего воздействия около основной модулирующей частоты – отношение общей мощности всех модулирующих частот к мощности основной модулирующей частоты – $A(f_{общ})/A(f_{max})$ при модуляции симпатической активности (LF-диапазона);

– степень концентрации мощности модулирующего воздействия около основной модулирующей частоты – $A(f_{общ})/A(f_{max})$ при модуляции парасимпатической активности (HF-диапазона).

При спектральном анализе временного ряда мощности HF- и LF-компонент в разных случаях выявлялось разное количество модулирующих частот, достоверно присутствующих в сигнале (от 1 до 6), которые находились в VLF-диапазоне (от 0,003 до 0,04 Гц). При этом среди всех частотных пиков всегда наблюдается наиболее мощный, который определяли как основной частотный источник модуляций (основная модулирующая частота). В случае если мощность основной модулирующей частоты существенно превышает значение общей мощности всех источников модуляции, можно предположить наличие резонансного эффекта увеличения амплитуды мощности при синхронизации частот модулирующих источников. Для анализируемых частотных компонент это означает захват частот всех модуляторов частотой основного источника (Киселев А.Р. и др. 2007;

Покровский В.М., 1988). Таким образом, показатель степени концентрации мощности модулирующего воздействия около основной модулирующей частоты отражает степень согласованности всех компонент, модулирующих активность симпатической и парасимпатической нервных систем.

4. Статистический анализ. В данной работе для разделения выборки на кластеры был применен метод *k*-средних. Статистическую оценку достоверности межгрупповых отличий и отличий показателей внутри кластеров осуществляли по *t*-критерию Стьюдента. Статистическую обработку данных выполняли с использованием программного комплекса STATISTICA 6.0.

Обсуждение результатов

Для поиска вегетативных коррелятов вербальных отображений эмоционального стресса проведен спектральный анализ динамики мощности LF- и HF-компонентов ВСР. Модуляции активности симпатической и парасимпатической систем мы рассматриваем как проявления надсегментарного уровня регуляции сердечного ритма. По показателям УЭД и спектральным характеристикам II порядка группа испытуемых была разделена на два кластера. Кластеры различаются статистически достоверно как по показателям эмоциональной дезадаптации, так и по показателям динамики вегетативной регуляции. Резко выраженная эмоциональная дезадаптация (эмоциональный стресс) согласуется с низким уровнем надсегментарного контроля (рис. 6). Отрицательные оценки собственного эмоционального состояния связаны с понижением мощности надсегментарного модулирующего воздействия на вегетативную регуляцию сердечного ритма. При этом чем выше уровень эмоционального стресса, тем менее локализован источник модуляции, управление не концентрировано.

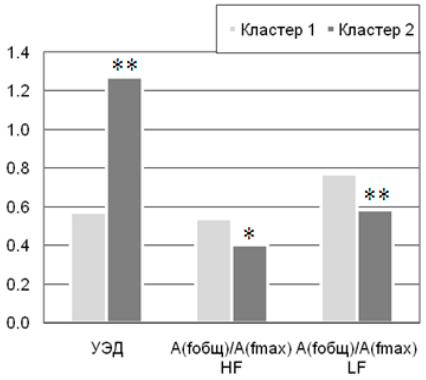


Рис. 6. Сравнение кластеров по уровню УЭД и степени концентрации мощности модулирующего воздействия около одной частоты при модуляции парасимпатической (HF-диапазон) и симпатической активности (LF-диапазон) (достоверность межгрупповых различий * < 0,05, ** < 0,01)

Анализ вегетативной регуляции сердечного ритма в выделенных кластерах указывает на достоверные различия в показателях активности как симпатической, так и парасимпатической системы. При низком уровне эмоциональной дезадаптации (1 кластер) выше общая мощность спектра и мощность для частотных диапазонов, соответствующих активности симпатической (LF) и парасиматической (HF) нервных систем (рис. 7). Таким образом, повышение уровня эмоционального стресса коррелирует с истощением ресурсов регуляторных систем.

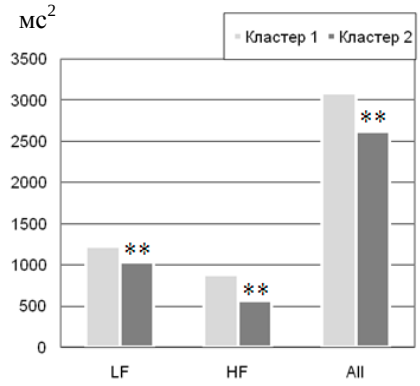


Рис. 7. Сравнение кластеров по спектральным показателям ВСР (достоверность межгрупповых различий ** < 0.01)

Выявлена связь между динамикой эмоционального состояния и динамикой вегетативной регуляции в течение суток (рис. 8).

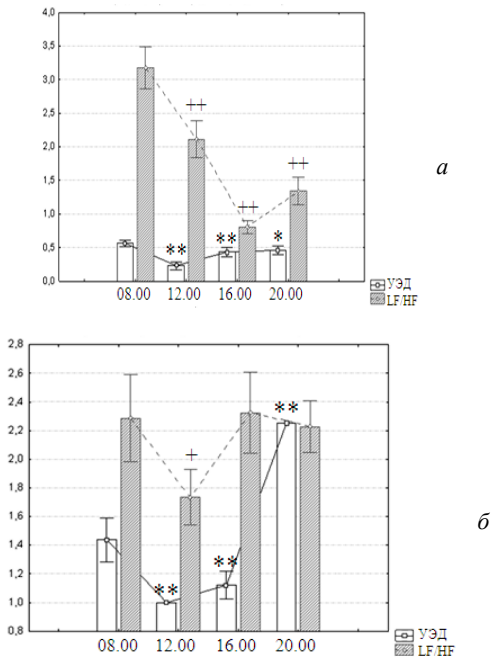


Рис. 8. Суточная динамика показателя УЭД и вегетативного баланса в выделенных кластерах (*а* –первый и *б* – второй кластеры) (достоверность различий относительно исходного значения УЭД * < 0,05, ** < 0,01, относительно исходного значения LF/HF+ < 0,05, ++ < 0,01)

В первом кластере при устойчивом эмоциональном благополучии в течение суток зарегистрировано перераспределение вегетативного баланса от симпатотонии утром к нормотонии вечером. Переход физиологической системы от напряженного состояния в начале рабочего дня на

низкоэнергетический уровень вечером может обеспечивать возможность восстановления энергетических ресурсов регуляторных систем и организма в целом. При этом значение УЭД колеблется около 1, что говорит об отсутствии эмоционального стресса. Во втором кластере, где выше УЭД, в течение всех суточных проб уровень вегетативного баланса показывает преобладание симпатических регуляторных влияний (показатель не опускается ниже 1,6). При этом уровень эмоционального стресса к концу дня имеет максимальное значение. Таким образом, можно заключить, что эмоциональный стресс сопровождается устойчивым истощением регуляторных систем организма.

Результаты индивидуального лонгитюдного исследования в течение 10 дней представлены на рис. 9 (7 из 10 дней).

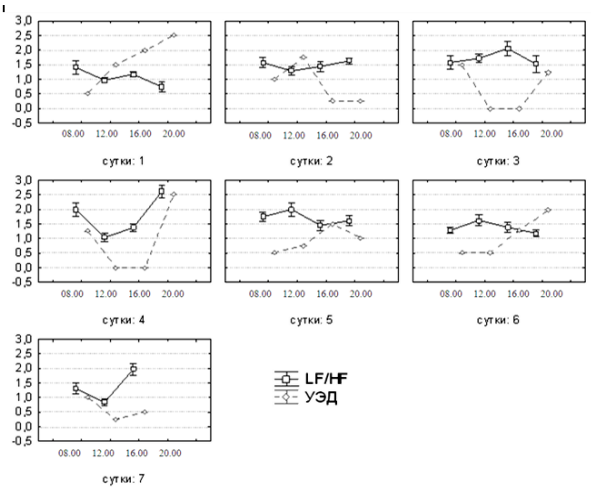


Рис. 9. Суточная динамика показателя УЭД и вегетативного баланса у испытуемого Р., исследованная на протяжении семи суток

Показано, что суточная динамика УЭД и уровня вегетативного баланса в пяти случаях из семи имеет характер обратной корреляции. В индивидуальном профиле суточной динамики увеличение эмоционального стресса происходит на фоне снижения симпатической активности. Этот результат персонифицированного мониторинга привлекает особое внимание, поскольку противоречит результатам анализа данных по выборке. Очевидна актуальность исследования индивидуальных и типологических особенностей связи между динамикой эмоционального статуса и динамикой вегетативной регуляции как в норме, так и при патологиях.

Заключение

В результате проведенного исследования было показано, что вегетативными коррелятами вербальных отображений эмоционального стресса могут быть спектральные показатели вариабельности сердечного ритма, при этом влияние высших регуляторных контуров проявляется в характеристиках спектра II порядка. Суточная динамика показателей УЭД и вегетативного баланса в выборочном исследовании характеризуется устойчивым доминированием симпатической активности при высоком уровне субъективного отображения эмоционального стресса. Однако в случае индивидуального лонгитюдного исследования выявлена связь увеличения уровня эмоциональной дезадаптации с уменьшением индекса вегетативного баланса. Это актуализирует значимость персонифицированного мониторинга при изучении вопросов связи эмоционального и вегетативного контекстов жизнедеятельности человека.

Работа выполнена при поддержке гранта ФЦП (Соглашение № 14.B37.21.0043).

Литература

1. *Davidson R.J.* Anxiety and affective style: role of prefrontal cortex and amygdala. // Biol Psychiatry, 2002, V. 51, No 1, p. 68–80.

2. *Mashin V.A.* The Relationship of the Slope of the Heart Rate Graph Regression with Linear and Nonlinear Heart Rate Dynamics in Stationary Short-time Series. // Biophysics, 2006, Vol. 51, No. 3, p. 471–479.

3. *Taylor G.J., Bagby R.M.* Alexithymia and the Five-Factor Model of Personality. // Personality Disorders and the Five Factor Model of Personality (3rd edition) (edited by T.A,.Widiger, and P.T.Costa). Jr. American Psychological Association: Washington, DC, 2013, p. 193–207.

4. *Александровский Ю.А.* Пограничные психические расстройства. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Медицина, 2000. 496 с.

5. *Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В., Гаврилушкин А.П., Довгалевский П.Я., Кукушкин Ю.А., Миронова Т.Ф., Прилуцкий Д.А., Семенов Ю.Н., Федоров В.Ф., Флейшман А.Н., Медведев М.М.* Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) // Вестник аритмологии. 2001. №24. С. 65–87.

6. *Григорьева В.Н., Тхостов А.Ш.* Способ оценки эмоционального состояния человека. Патент Российской Федерации RU 2291720 C1. Опубл. 20.01.2007 в Б.И. №2

7. *Киселев А.Р., Беспятов А.Б., Посненкова О.М., Гриднев В.И., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Довгалевский П.Я.* Внутренняя синхронизация основных 0,1Гц-частотных ритмов в системе вегетативного управления сердечно-сосудистой системой // Физиология человека. 2007. Т. 33, № 2. С. 69–75.

8. *Покровский В.М.* Механизмы экстракардиальной регуляции ритма сердца // Физиологический журнал СССР. 1988. Т. 74, № 2. С. 259–264.

9. *Яхно Н.Н., Парфенов В.А.* Общая неврология. Учебное пособие для студентов медицинских вузов. М. : МИА, 2009. 200 с.

Об одном подходе к разработке автоматизированной системы дистанционного обучения произношению слов на основе вероятностной нейронной сети с проверкой однородности

А.В. Савченко

Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Н. Новгород
ЗАО "ИстраСофт", Москва, avsavchenko@hse.ru

К числу приоритетных направлений в области систем искусственного интеллекта относятся проблемы современной диалектологии и построение автоматизированных систем *дистанционного* обучения языкам [1]. Технологии выделения, измерения звуков и цифровая оценка их произношения относительно эталона в отдельных звуках и словах к настоящему времени реализованы в программах обучения языкам серии «Профессор Хиггинс» компании ИстраСофт [2], издаваемых и поставляемых на российский и зарубежные рынки (1995–2011 гг.), что существенно отличает эти программы по функциональным возможностям от всех остальных существующих на рынке программ. Реализованные в этой системе технологии [3] позволяют выделить и измерить в речевом сигнале элементарные звуки (фонемы), независимо от говорящего. Особенность обучения фонетике заключается в сравнении собственного произношения с эталонным не только на слух, но и визуально, по графику на экране монитора. Выделение звуковых частей слова – фонем, основанное на оригинальных технологиях автоматического распознавания речи, объективная оценка правильности их произношения в баллах дают возможность увидеть ошибки и исправить их в процессе тренировки. Однако некоторые важные функции оценки правильности произношения звуков речи до настоящего времени не реализованы. Кроме того, в настоящее время системы «Профессор Хиггинс» не рассчитаны на дистанционное обучение и требуют установки на стационарный компьютер пользователя. Развитию новых возможностей в области технологий распознавания речи и обучения языкам и посвящена настоящая работа.

По результатам экспериментальных исследований [4] информационной системы фонетического анализа речи, основанной на информационной теории восприятия речи [5] и использующей признаки фонем, применяемые в системах обучения языку «Профессор Хиггинс», можно дать следующие направления модернизации:

1) автоматизированная идентификация обучающегося;

2) оценка близости сигналов на основе принципа минимума информационного рассогласования Кульбака – Лейблера [6] и применение авторегрессионной (АР) модели стационарных участков речевого сигнала;

3) выполнение автоматической сегментации произнесенных обучающимся слов/выражений и применение алгоритма распознавания для выделенных фонем.

Рассмотрим эти предложения подробнее.

Идентификация пользователя на основе алгоритма распознавания лиц по видеоизображению

Для переноса системы обучения в дистанционный режим отметим одну из основных его проблем – автоматизированного определения того, что в течение всего курса и при тестировании качества обучения (экзамен) обучается один и тот же человек. Таким образом, могут быть поставлены следующие задачи:

а) идентификация подключившегося к системе пользователя;

б) в процессе обучения/тестирования в течение всего сеанса в режиме реального времени проконтролировать, чтоб не происходила подмена обучающегося (по сравнению с предыдущими и с текущим сеансами).

В данной работе для решения обеих задач предлагается воспользоваться технологией идентификации человека по видеоизображению. Лица на фотографиях выделялись с помощью библиотеки OpenCV. Далее выполнялась медианная фильтрация с размером окна 3×3 пикселя. Все изображения лиц предварительно разбивались на 100 (10×10) фрагментов. В качестве признаков каждого фрагмента использовались гистограммы ориентированных градиентов (histograms of oriented gradients, HOG) [7]. Вся область определения направления градиента разбивалась на N = 8 участков (по $\pi/4$ радиан каждый) [8]. Общее рассогласование между двумя изображениями рассчитывалось как сумма рассогласований между соответствующими фрагментами, причём для учёта неоднородности ракурса и неточности детектирования лица каждая часть распознаваемого изображения сопоставлялась с фрагментами эталона из окрестности 3×3 [9]. Для вычисления расстояния между гистограммами $H^{(\mu)} = \left\lfloor h_1^{(1)},...,h_N^{(1)} \right\rfloor$, $\mu \in \{1,2\}$ применялось предложенное нами ранее оптимальное в байесовском смысле решение задачи распознавания образов на основе вероятностной нейронной сети с проверкой однородности [10]:

$$\rho_{PNNH}\left(H^{(1)},H^{(2)}\right) = \\ = \sum_{i=1}^{N}\left(h_i^{(1)}\ln\frac{2h_{K;i}^{(1)}}{h_{K;i}^{(1)}+h_{K;i}^{(2)}} + h_i^{(2)}\ln\frac{2h_{K;i}^{(2)}}{h_{K;i}^{(1)}+h_{K;i}^{(2)}}\right),$$

где

$$h_{K;i}^{(\mu)} = \sum_{j=1}^{N} K_{ij} h_j^{(\mu)}, \mu \in \{1,2\} -$$

свертка гистограммы $H(\mu)$ с гауссовским ядром Розенблатта – Парзена K_{ij} [10].

Система обучения реализована на языке C# в виде веб-приложения Silverlight 4.0. Пример экранной формы приведен на рис. 1.

Рис. 1. Экранная форма системы обучения в режиме идентификации пользователя

Первая из отмеченных в разделе задач (идентификация подключившегося пользователя) производится разработанной нами WCF-службой, которой из клиентского приложения передается полутоновое изображение лица. Эта служба выполняется на сервере, на котором хранится база данных всех пользователей. Вторая задача решается самим клиентским приложением в режиме реального времени. Если расстояние между выделенным в текущий момент лицом пользователя и его изображением в начальный момент времени превышает некоторый фиксированный порог, то WCF-службе отправляется специальное сообщение, а метка-расстояние (см. рис. 1) окрашивается красным цветом.

Критерий минимума информационного рассогласования в задаче обучения звукам

Далее рассмотрим обработку речевого сигнала в разработанной системе. Алгоритмы оценки спектральной плотности мощности (СПМ) речевого сигнала на основе БИХ-фильтров (фильтры с бесконечной импульсной характеристикой) [4], применяемые в системах «Профессор Хиггинс», настроены только для одного формата звукового файла (16 бит, 22 кГц), что препятствует их использованию во многих системах анализа речи, которые в силу ограничений канала связи требуют частоты дискретизации F = 8 кГц (или, в крайнем случае, 16 кГц). Более гибким нам представляется использование БПФ или АР-оценок спектра, которые по производительности не уступают БИХ-фильтровой оценке.

Для выделения частотных признаков используется следующий алгоритм [2, 3]:

1. Получение звукового сигнала $\mathbf{x}$ с микрофона.

2. Разбиение сигнала на сегменты $\mathbf{x}(t)$, $t = \overline{1,T}$ длительностью 10 мс, где T – общее количество сегментов.

3. Оценка СПМ $G_t(f), f = \overline{1,F}$ для каждого сегмента $\mathbf{x}(t)$ на основе АР-модели [1, 4]. Здесь F – частота дискретизации.

4. Получение массива амплитудных кодов СПМ $\mathbf{g}^{(t)} = \left[g_1^{(t)},...,g_M^{(t)}\right]$ – по одному значению для каждого из $M = 9$ диапазона частот $\left(f_1^{(m)}, f_2^{(m)}\right), m = \overline{1,M}$, которые были определены опытным путем [3], следующим образом:

$$g_m^{(t)} = \sum_{f=f_1^{(m)}}^{f_2^{(m)}} G_t(f).$$

5. Для удаления не воспринимаемых человеком частотных признаков применение алгоритмов психоакустики – частотное маскирование и наложение кривой равной громкости

6. Нормировка признаков по максимальному значению. Получение итогового набора признаков $\tilde{\mathbf{g}}^{(t)} = \left[\tilde{g}_1^{(t)},...,\tilde{g}_M^{(t)}\right]$.

Для оценки качества произношения звука предлагается не только определять сходство с эталонным звуком, но и вычислять рассогласования до всех остальных звуков (осуществлять распознавание). Тем самым каждый произнесенный звук будет характеризоваться не только близостью к эталону, но и его различимостью от других эталонов. Результаты экспериментальных исследований [4] подтвердили известный факт логарифмического восприятия человеком амплитуды речевого сигнала. Как следствие, качество распознавания фонем для метрики L_2, применяемой в настоящее время в системах «Профессор Хиггинс», является неудовлетворительным. Рекомендуем для сопоставления признаков речевых сигналов воспользоваться информационным рассогласованием Кульбака – Лейблера, являющимся, как известно, сильно коррелированным с субъективными оценками близости речевых сигналов (MOS, mean opinion score) [11]:

$$\rho(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}_r) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \left(\frac{\tilde{g}_m(r)}{\tilde{g}_m^{(t)}} - \ln \frac{\tilde{g}_m(r)}{\tilde{g}_m^{(t)}} \right) - 1, \quad (1)$$

где $\{\mathbf{x}_r\}, r = \overline{1,R}$ – набор эталонных фонем, R – количество эталонов, $\tilde{g}_m(r)$ – признаки r-го эталона. Неплохие результаты показали также другие рассогласования, такие как расстояние Итакуры-Саито, кепстральное расстояние SD, мера близости COSH [4, 11].

Сегментация речи на основе вероятностной нейронной сети с проверкой однородности

Адаптация системы обучения к новому разговорному языку требует произнесения и ручной сегментации не только всех фонем языка, но и

всех слов/фраз, используемых в процессе обучения. Время адаптации можно существенно уменьшить, если выполнить автоматическую сегментацию речевого сигнала на последовательность стационарных фонем, по алгоритму, предложенному в рамках информационной теории восприятия речи [5]. В результате ручную сегментацию выполнять уже не требуется.

На первом этапе тестирования качества обучения выполняется *периодизация первого уровня*. Требуется для заданного речевого сигнала $\mathbf{x}$ определить множество всех однородных сегментов (минимальных звуковых единиц типа отдельных фонем) $\{X_r\}$ как результат линейного членения исходного сигнала на квазистационарные последовательности фреймов $\mathbf{x} = \{\mathbf{x}_1,...,\mathbf{x}_L\}$. Алгоритм сводится к последовательной проверке условия однородности распределений вектора отсчетов $\mathbf{x}(t)$ анализируемого (текущего) фрейма и вектора отсчетов текущего однородного сегмента $\mathbf{x}_l$. Обычно применяется сопоставление расстояния между $\mathbf{x}(t)$ и $\mathbf{x}_l$ с наперед заданным порогом

$$\rho(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}_l) < \rho_0 . \quad (2)$$

При нарушении условия (2) в списке однородных сегментов появляется еще один, *N+1* сегмент, состоящий из одного сегмента $\mathbf{x}(t)$. Однако с учетом теории распознавания образов более правильным здесь нам представляется сведение задачи к статистической проверке однородности [10]. Можно показать, что, если сигналы $\mathbf{x}(t)$ и $\mathbf{x}_l$ порождены АР-процессом порядка *p*, имеют гауссовское распределение с нулевым средним и неизвестными автокорреляционными матрицами, соответственно, а векторы $\mathbf{x}_i(t) = [x_i(t)...x_{i+p}(t)]^T$, $i = \overline{1, \Delta - p}$ независимы (здесь Δ – длительность сегмента в отсчетах), то оптимальное в смысле максимального правдоподобия в асимптотике ($\Lambda \to \infty$) решение задачи проверки однородности дает критерий на основе вероятностной нейронной сети с проверкой однородности [10]:

$$\rho(\mathbf{x}_l, \tilde{\mathbf{x}}) + \frac{\Lambda - p}{\Delta t_l} \rho(\mathbf{x}(t), \tilde{\mathbf{x}}) < \rho_1 = \text{const}, \quad (3)$$

где Δt_l – длительность (в сегментах) однородного участка $\mathbf{x}_l$, а $\tilde{\mathbf{x}} = [\mathbf{x}_l, \mathbf{x}(t)]^T$. Вычисления по схеме (3) повторяются циклически для всех последующих фреймов из речевого сигнала, причем повторяются «нарастающим итогом» для переменного значения *N* = 1, 2,… В результате получим множество из *L* выявленных на первом этапе обработки фонем. Понятно, что с точки зрения качества полученного результата первостепенный интерес представляет собой множество четких фонем. Поэтому далее используется дополнительная процедура отбраковки сомнительных по своей четкости фонем путем установления к ним требования по минимальной длительности однородных сегментов:

$$\Delta t_l \geq \Delta_0, l = \overline{1, L} .$$

Здесь Δ_0 – пороговый уровень для минимального числа отсчетов в результирующем списке фонем. Множество $L^*<L$ четких фонем $\{\mathbf{x}_l^*\}, l = \overline{1, L^*}$ и следует считать, в общем случае, основным результатом фонетического анализа речи на первом этапе обработки.

На втором этапе (*периодизация второго уровня*) выделенные однородные сегменты объединяются в кластер речевых единиц типа отдельных фонем. Алгоритм сводится к последовательной проверке условия для всех $l = \overline{1, L^*}$

$$\exists j \in \{1,..., l_r\} \rho(\mathbf{x}_l^*, \mathbf{x}_j^{(r)}) < \rho_2 = \text{const}, \; r = \overline{1, R} \quad (4)$$

об однородности распределений вектора отсчетов текущего однородного участка $\mathbf{x}_l^*$ и вектора отсчетов эталонов фонемы из списка $\{\mathbf{X}_r^*\}$. Здесь ρ_2 – допустимый уровень рассогласования в пределах фонемы, а кластер $\mathbf{X}_r^*$ представляет собой множество объема l_r близких однородных сегментов $\mathbf{X}_r^* = \{\mathbf{x}_1^{(r)},...,\mathbf{x}_{l_r}^{(r)}\}$. Если условие (4) выполняется для некоторого *r*, то $\mathbf{x}_l^*$ добавляется в кластер $\mathbf{X}_r^*$, т. е. используется алгоритм кластеризации типа single link. При нарушении условия (4) в список однородных сегментов появляется еще один эталон $\mathbf{X}_{R+1}^*$, состоящий из одного (последнего проверенного) сигнала $\mathbf{x}_l^*$. Вычисления повторяются циклически для всех последующих однородных сегментов из речевого сигнала. В результате получим множество кластеров $\{\mathbf{X}_r^*\}$ из выявленных на втором этапе обработки фонем. После этого происходит их визуализация на временной диаграмме сигнала. Сегменты из одного кластера окрашиваются одинаковым цветом. Ставится задача присвоить цвета кластерам так, чтобы близкие кластеры (в смысле расстояния (1) между их элементами) имели близкие цвета, а удаленные были окрашены в различные цвета. Для визуализации использовалась модель формирования цвета HSV (hue-saturation-value). Цвет определяется тоном (hue), а насыщенность и яркость характеризуют малоразличимые параметры цвета. Поэтому для каждого кластера требовалось определить параметр тона h_r (в градусах), а насыщенность и яркость были зафиксированы (0,4 и 1,0 соответственно), чтобы не оттенять временную диаграмму сигнала. Расстояние между двумя кластерами $\mathbf{X}_{r_1}^*$ и $\mathbf{X}_{r_2}^*$ определялось по следующей формуле

$$\rho(\mathbf{X}_{r_1}^*, \mathbf{X}_{r_2}^*) = \min_{j_1=\overline{1,l_{r_1}}, j_2=\overline{1,l_{r_2}}} \rho(\mathbf{x}_{j_1}^{(r_1)}, \mathbf{x}_{j_2}^{(r_2)}).$$

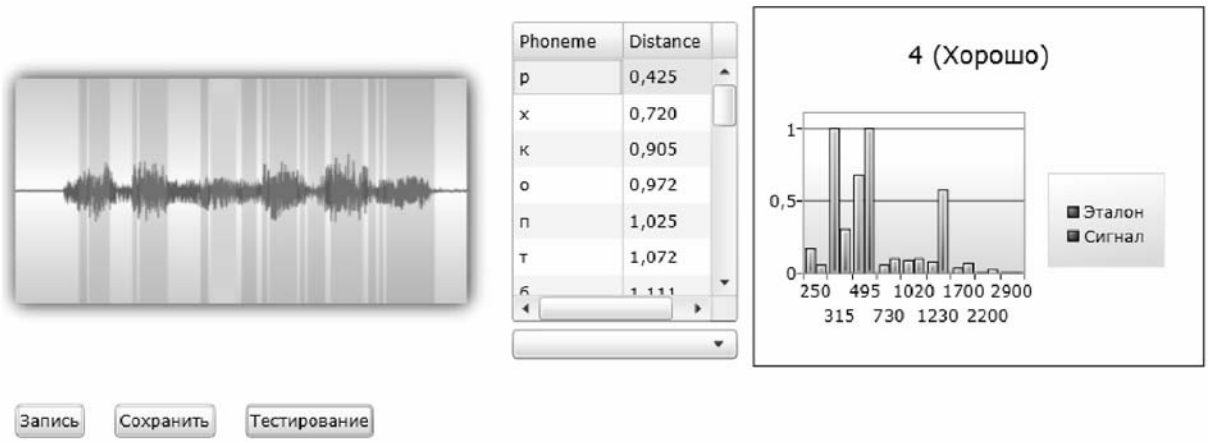


Рис. 2. Пример экранной формы обучения в режиме тестирования произношения словосочетания.

Расстояние между двумя тонами h_{r_1} и h_{r_2} рассчитывается по стандартной формуле

$$d\left(h_{r_1}, h_{r_2}\right) = 180 - \left|180 - \left|h_{r_1} - h_{r_2}\right|\right|.$$

Так как максимальное расстояние между тонами составляет 180, то выполнялось предварительное нормирование расстояния между кластерами на величину

$$\rho_{\max} = \max_{r_1=1,R, r_2=1,R} \rho\left(\mathbf{X}^*_{r_1}, \mathbf{X}^*_{r_2}\right).$$

Для определения тонов $\{h_r\}, r = \overline{1,R}$ использовался критерий оптимальности

$$\max_{r_1=1,R} \sum_{r_1=1}^{R} \left| d\left(h_{r_1}, h_{r_2}\right) - \frac{180 \cdot \rho\left(\mathbf{X}^*_{r_1}, \mathbf{X}^*_{r_2}\right)}{\rho_{\max}} \right| \to \min_{\{h_r\}}. \quad (5)$$

Оптимизационная задача (5) решалась с помощью стандартной вариации генетического алгоритма – эволюционной стратегии (μ, λ) [12]. Параметры были зафиксированы следующим образом: $\mu = 10, \lambda = 40$, число поколений 100. Найденные оптимальные значения параметра тона $\{h_r\}, r = \overline{1,R}$ и использовались для окрашивания выделенных по алгоритму (2)–(4) кластеров фонем. Пример экранной формы разработанной системы обучения после выделения во фразе фонем показан на рис. 2.

Таким образом, в настоящей работе рассмотрены основные алгоритмы и их программная реализация на платформе Silverlight, которые могут успешно применяться для переноса систем обучения языку (на примере программ серии «Профессор Хиггинс» компании ИстраСофт) [2] в режим дистанционного обучения.

Благодарности. Исследование осуществлено в рамках Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2013–2014 гг., проект № 12-01-0003.

Литература

1. *Савченко В.В., Акатьев Д.Ю.* Технология обучения и тестирования речи на основе когнитивной кластерной модели минимальных речевых единиц // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях; II всерос. науч. конф. Н. Новгород, 2011. С. 175–177.

2. *ЗАО "ИстраСофт"*. Профессор Хиггинс: Английский без акцента! версия 6.0 // Программа для ЭВМ. Свид-во о гос. регистрации № 2009614030 по заявке 2009612807 от 09.06.2009, зарег. 30.07.2009.

3. *Кнеллер Э.Г.* Инновационные исследования в распознавании речи и их коммерциализация // Первая межд. конф. Сколково: Санкт-Петербург, 2011, http://www.istrasoft.ru/ru/tehnologii/innovacionnye-issledovanija-v-raspoznavanii-rechi-i-ih-kommercializacija.html.

4. *Савченко А.В.* Автоматическое построение фонетической транскрипции речи на основе принципа минимума информационного рассогласования // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2012. № 8. С. 14–19

5. *Савченко В.В.* Информационная теория восприятия речи // Изв. вузов России. Радиоэлектроника, 2007. Вып. 6. С. 3–9.

6. *Kullback S.* Information Theory and statistics. Dover Publications, 1997. 399 p

7. *Dalal N., Triggs B.* Histograms of Oriented Gradients for Human Detection // Proc. Computer Vision & Pattern Recognition, 2005. P. 886–893

8. *Savchenko A.V.* Directed enumeration method in image recognition // Pattern Recognition, 2012. V. 45, № 8. P. 2952–2961.

9. *Savchenko A.V.* Face Recognition in Real-Time Applications: Comparison of Directed Enumeration Method and K-d Trees // Proc. BIR 2012, LNBIP, 2012. V. 128. P. 187–199.

10. *Savchenko A.V.* Statistical Recognition of a Set of Patterns Using Novel Probability Neural Network, // Proc. ANNPR 2012. LNCS, 2012. V. 7477. P. 93–103.

11. *Benesty J., Sondh M., Huang Y.* Springer Handbook of Speech Recognition. NY:Springer, 2008. 1176 p.

12. *Рутковский Л.* Методы и технологии искусственного интеллекта. М.: Горячая линия - Телеком, 2010. 520 с.

Выделение признаков речевого сигнала на основе теории приближенных множеств в методе нечеткого фонетического декодирования слов

Л.В. Савченко, Д.Ю. Акатьев

Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова
lyudmilasavchenko@yandex.ru

Одной из целей всего направления искусственного интеллекта является создание компьютерных программ, способных понимать и строить фразы на человеческом языке [1]. Задача автоматического распознавания речи (АРР) – наиболее актуальное направление в области человеко-машинного взаимодействия. К сожалению, существующие алгоритмы распознавания русской речи обычно не используют теорию нечетких множеств, хотя известно, что способность оперировать нечеткими множествами и вытекающая из нее способность оценивать информацию, является одним из наиболее ценных качеств человеческого разума, которое фундаментальным образом отличает его от машинного разума [2]. Еще создатель нечеткой логики Л. Заде [2] заметил, что для решения сложных задач, когда человеку трудно дать точное решение, его мозг использует неточность или нечеткость, которая лежит в самой природе принятия решений.

В данной работе предложена модификация метода нечеткого фонетического декодирования слов (НФДС) распознавания русской речи [3], который основан на теории нечетких множеств и известном методе фонетического декодирования слов (ФДС) [4]. Предложенная модификация, в отличие от оригинального НФДС, использует признаки согласных звуков. Для выделения этих признаков применялся алгоритм машинного обучения на основе приближенных множеств. В экспериментальной части статьи показано, что предложенный алгоритм превосходит по точности распознавания слов существующий ФДС на 20% и оригинальный НФДС на 4%.

Метод нечеткого фонетического декодирования слов

Рассмотрим задачу распознавания изолированных слов. Пусть задано множество из $L>1$ эталонных слов $\{X_l\}$, где $l=\overline{1,L}$ – номер слова-эталона. Согласно фонетическому подходу, каждое эталонное слово разбивается на последовательность фонем (транскрипцию) $X_l=\{c_{l,1},c_{l,2},...,c_{l,L_l}\}$ [4]. Здесь L_l – длительность команды (в фонемах), а числа $c_{l,j}\in\{1.,,,.R\}$ – номера фонем из фонетического алфавита $\{\mathbf{x}_r^*\}r=\overline{1,R}$, где R – количество фонем в алфавите. Задача состоит в том, чтобы поступившему на вход речевому сигналу (слову) X поставить в соответствие наиболее близкое к нему слово-эталон.

Сведем задачу распознавания изолированных слов к распознаванию гласных фонем в слоге. Вновь поступающему на вход слогу $\mathbf{x}$ требуется поставить в соответствие одну из R эталонных фонем $\mathbf{x}_r^*$. Вначале каждый слог разбивается на непересекающиеся сегменты $\{\mathbf{x}(t)\}$, $t=\overline{1,T}$ длиной $\tau\approx(0,01-0,015)$ с. Далее каждый полученный сегмент отождествляется с той из фонем-эталонов, которая отвечает принципу минимума информационного рассогласования Кульбака – Лейблера [5] $\rho\left(\mathbf{x}(t)/\mathbf{x}_r^*\right)$ между сигналом $\mathbf{x}(t)$ и эталоном $\mathbf{x}_r^*$. На практике для вычисления $\rho\left(\mathbf{x}(t)/\mathbf{x}_r^*\right)$ в режиме реального времени часто применяется метод обеляющего фильтра [6].

Итоговое решение принимается в пользу наиболее часто встречающегося кода по всем моментам времени. Описанный подход представляет алгоритм ФДС в задаче АРР. Чтобы избежать пропуска истинной фонемы обычно близкие между собой фонемы ({а, я}, {у, ю}, {о, ё}, {э, е}, {ы, и}) объединяют в один кластер. Это приводит к значительному сокращению количества различимых фонем и, как следствие, к увеличению числа альтернативных решений на выходе алгоритма АРР, особенно для коротких по длительности слов.

Метод НФДС [3] позволяет устранить недостаток метода ФДС за счет того, что учитывает матрицу попарных расстояний $\rho_{ij}=\rho\left(\mathbf{x}_i^*/\mathbf{x}_j^*\right)$, где $\rho\left(\mathbf{x}_i^*/\mathbf{x}_j^*\right)$ – информационное рассогласование Кульбака – Лейблера [5] между эталонами $\mathbf{x}_j^*$ и $\mathbf{x}_i^*$. В НФДС каждому слогу ставится в соответствие не один эталон $\mathbf{x}_r^*$ (как в ФДС), а нечеткое множество $\left\{\left(\mathbf{x}_r^*,\mu_j\left(\mathbf{x}_r^*\right)\right)\right\}$, где $\mu_j\left(\mathbf{x}_r^*\right)$ – степень принадлежности эталона $\mathbf{x}_r^*$ к j-й фонеме, а r – количество эталонных фонем. Известно [5], что статистика информационного рассогласования Кульбака – Лейблера для метода обеляющего фильтра имеет распределение χ^2_K, где $K\approx F\tau p$ – число степеней свободы (здесь F – частота дис-

кретизации, Гц; τ – длительность сегмента $\mathbf{x}(t)$ в с, p – порядок авторегрессионной модели), поэтому степень принадлежности можно определить как $\mu_j\left(\mathbf{x}_r^*\right)=P\left(\rho_{rj}<\chi_K^2\right)$. Входному сигналу $\mathbf{x}(t)$ также ставится в соответствие нечеткое множество вида $\left\{\left(\mathbf{x}_r^*,\mu\left(\mathbf{x}(t)/\mathbf{x}_r^*\right)\right)\right\}$. Далее для каждого сегмента $\mathbf{x}(t)$, используя операцию нечеткого пересечения множеств $\left\{\left(\mathbf{x}_r^*,\mu_j\left(\mathbf{x}_r^*\right)\right)\right\}$ и $\left\{\left(\mathbf{x}_r^*,\mu(\mathbf{x}(t)/\mathbf{x}_r^*\right)\right\}$ получаем результирующее множество $\left\{\mathbf{x}_r^*,\mu(r,t)\right\}$:

$$\mu(r,t)=\min\left(\mu_{\nu(t)}\left(\mathbf{x}_r^*\right),\mu\left(\mathbf{x}(t)/\mathbf{x}_r^*\right)\right), \quad (1)$$

где $\nu(t)=\arg\min\limits_{r=\overline{1,R}}\rho\left(\mathbf{x}(t),\mathbf{x}_r^*\right)$, $t=\overline{1,T}$. Далее на основе всех $\mu(r,t)$ требуется принять решение в пользу принадлежности слога к одной из R эталонных фонем. В данной работе решение принимается простым голосованием $\mu(r)=\frac{1}{T}\sum\limits_{t=1}^{T}\mu(r,t)$. В результате на выходе алгоритма распознавания слогов получаем нечеткое множество $\left\{\left(\mathbf{x}_r^*,\mu(r)\right)\right\}$. Степень принадлежности μ_l распознаваемого слова X определяется как среднее арифметическое степеней принадлежности слогов $\mu(r)$, составляющих слово. На выходе распознавания слов методом НФДС мы получаем нечеткое множество $\left\{\left(X_l,\mu_l\right)\right\}$. Итоговое решение в задаче распознавания слов принимается в пользу слова X^* по критерию максимума μ_l.

Выделение признаков на основе теории приближенных множеств

Заметим, что оригинальный метод НФДС для распознавания слов использует информацию только о гласных звуках, так как качество их распознавания наиболее высоко за счет того, что они характеризуются наличием тона в процессе произношения. В настоящей работе для повышения точности распознавания слов предложено использовать дополнительную информацию о согласных звуках. Для этого рассмотрим следующие классы согласных звуков по соотношению тона и шума в производстве согласных звуков [7]:

1. Сонорный (С) – м, н, л, р. У сонорных согласных акустической основой является тон, по этому признаку они наиболее близки к гласным.

2. Звонкий (З) – б, в, д, г, з, й. В звонких согласных тон преобладает над шумом.

3. Глухой (Г) – п, к, с, т, ц, ф, х. Для глухих согласных шум преобладает над голосом.

4. Шипящий (Ш) – ш, щ, ж, ч. Шипящие согласные характеризуются тем, что их акустической основой является только шум.

Для всех четырех классов были выявлены три наиболее характерных признака: длительность $t_{\text{сегм}}$ (количество сегментов), отношение максимальной амплитуды фонемы к максимальной амплитуде содержащего её слога $X_{\max}$ и частота $F_{\max}$, при которой спектральная плотность мощности (СПМ) принимает максимальное значение.

В качестве примера приведем амплитуду временного сигнала «ша» (рис. 1), где черная вертикальная линия показывает границы звуковых сегментов «ш» и «а», выделенных с помощью программы сегментации.

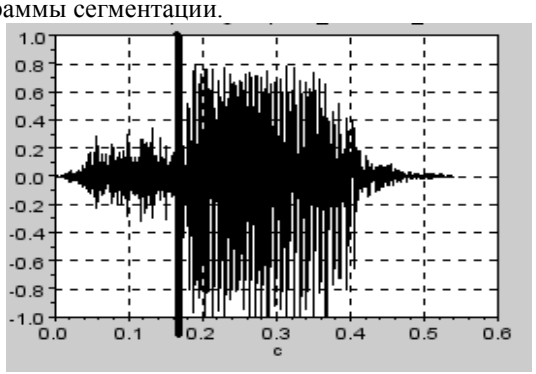
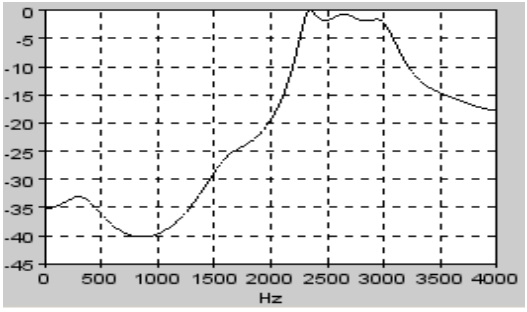
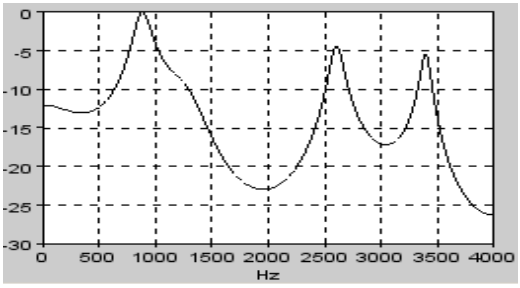


Рис. 1. Временная диаграмма речевого сигнала «ша»

Далее на рис. 2 приведены зависимости огибающей СПМ для фонем «ш» и «а», выделенных из сигнала, который показан ранее на рис. 1.



а



б

Рис. 2. СПМ фонемы «ш» (*а*), СПМ фонемы «а» (*б*)

Из рис. 1 видно, что $X_{\max}=0,35$ и $X_{\max}=1$ для фонемы «ш» и «а» соответственно и по длительности ($t_{\text{сегм}}$) гласная фонема в три раза превосходит фонему «ш». Из рис. 2 видно, что

$F_{\max} = 2410$ Гц и $F_{\max} = 760$ Гц для фонемы «ш» и «а» соответственно. Таким образом, по трем перечисленным выше признакам, звуки можно попытаться различить межу собой.

Для выделения признаков согласных применялся алгоритм машинного обучения на основе приближенных множеств [8]. Для этого были взяты 500 реализаций (по 100 реализаций на каждый класс, включая гласные), из них был сформирован текстовый файл, который подавался на вход программе Rough Set Exploration System 2.2.2. На выходе программа машинного обучения на основе приближенных множеств [9] выдала набор из 17 правил. Приведем наиболее характерные правила для каждого класса (табл. 1):

Таблица 1

Наиболее характерные правила для каждого класса звука

Класс	Правила
Гласный	▪ $t_{сегм} \geq 6$; $0.75 \leq X_{\max} \leq 1$
Сонорный (С)	▪ $t_{сегм} < 6$; $0.65 \leq X_{\max} \leq 1$ ▪ $0.35 \leq X_{\max} < 0.65$; $265 \leq F_{\max} \leq 2210$
Звонкий (З)	▪ $0.20 \leq X_{\max} \leq 0.40$; $F_{\max} \leq 265$
Глухой (Г)	▪ $0 < X_{\max} \leq 0.1$; $F_{\max} > 2210$
Шипящий (Ш)	▪ $t_{сегм} < 5$; $0.1 < X_{\max} \leq 0.37$; $F_{\max} > 2210$

Далее в табл. 2 приведена точность распознавания (в %) звуков каждого класса, усредненная по всем тестовым реализациям. Для тестирования были взяты 80 реализаций фонем каждого класса.

Таблица 2

Точность распознавания различных звуков русского языка

	Распознано, %	Не распознано, %	Распознано неверно, %
Звонкие	76	12	12
Сонорные	77	15	8
Шипящие	73	7	20
Глухие	28	72	0
Гласные	96	4	0

Как видно из табл. 2, наиболее хорошо распознаются гласные звуки (96%), а всех хуже – глухие согласные (28%). В то же время сонорные, звонкие и шипящие фонемы распознаются достаточно хорошо, поэтому выделенные признаки можно применять для повышения точности распознавания.

Результаты экспериментальных исследований в задаче распознавания слов

Далее проведем сравнение оригинального метода ФДС, оригинального метода НФДС, а также методов ФДС и НФДС с выделением признаков фонем речевого сигнала. Сравнение сигналов проводилось по методу обеляющего фильтра, порядок авторегрессионной модели p=20, частота дискретизации F=8 кГц. В качестве эталонов использовались десять изолированно произнесенных гласных фонем русского языка (а, я, у, ю, о, ё, э, е, ы, и) одного диктора. В качестве словаря эталонов использовался перечень продуктов питания (310 наименований). Для тестирования другой диктор (дикторонезависимый режим) трижды произносил каждое слово/словосочетание из словаря с четким выделением слогов.

Оценка вероятности ошибки распознавания (в процентах), усредненная по всем тестовым реализациям, представлена в табл. 3. Слово считается распознанным верно, если не существует ни одного слова с большей степенью принадлежности, чем истинное. Если существует несколько слов с одинаковой степенью принадлежности (например: «айва», «банан», «гранат» и «сайра» для методов ФДС и НФДС), то решение принимается в пользу минимального (в смысле лексикографического порядка) слова.

Таблица 3

Вероятность ошибки распознавания, усредненная по всем тестовым реализациям

Метод	Ошибка распознавания (%)	
	без признаков	с признаками
ФДС	28	21
НФДС	16	12

Как видно из табл. 3, учет признаков согласных, выделенных с помощью алгоритма машинного обучения на основе приближенных множеств, позволяет понизить ошибку распознавания для метода ФДС на 7%, а для метода НФДС на 4%. Это связано с тем, что на выходе алгоритма распознавания уменьшается количество альтернативных слов.

Далее рассмотрим пример работы метода НФДС с выделенными признаками при распознавании слова «банан». На выходе алгоритма распознавания получается нечеткое множество $\{\langle X_l, \mu_l \rangle\}$: {(айва, 0.956), (банан, 0.956), (гранат, 0.956), (сайра, 0.956)}. Преобразуем его в множество вида {()(ЗЗ), 0.956, (З)(СС), 0.956, (ЗС)(СГ), 0.956, (Г)(ЗС), 0.956} (здесь круглые скобки обозначают границы слогов). Распознаваемый речевой сигнал в свою очередь разбивается на стационарные сегменты [10], каждый из которых с помощью алгоритма машинного обучения отождествляются с одним из пяти классов, рассмотренных в табл. 1. Для нашего примера получим следующую последовательность кодов: (З)(ССС-) ("-" означает, что сегмент не был распознан, т.е. не принадлежит ни одному из пяти классов). Полученная последовательность сравнивается послого-

во с последовательностью, соответствующей каждому эталону из словаря. Если код класса согласных из распознаваемой последовательности встречается в последовательности из словаря, то к μ_l прибавляется некоторое $\Delta\mu$. В общем случае $\Delta\mu$ для каждого класса может быть своим. Для нашего примера хорошие экспериментальные результаты показало $\Delta\mu = 0.01$ для каждого класса согласных. В результате на выходе алгоритма распознавания будем иметь новое нечеткое множество $\{(X_l, \mu_l + k * \Delta\mu)\}$, где k – количество совпадений. Далее в табл. 4 представлено количество совпадений для каждого слога трех слов.

Таблица 4

Количество совпадений согласных

Номер слова в словаре	Коды слогов	Количество совпадений	Степень принадлежности $\mu_l + k * \Delta\mu$
1.айва	( )	0	0.956+0*0.01
	(ЗЗ)	0	
2.банан	(З)	1	0.956+3*0.01
	(СС)	2	
3.гранат	(ЗС)	1	0.956+2*0.01
	(СГ)	1	
4.сайра	(Г)	0	0.956+1*0.01
	(ЗС)	1	

Итоговое решение в задаче распознавания слов принимается в пользу слова X^* по критерию максимума $\mu_l + k * \Delta\mu$. Для нашего примера получаем следующее нечеткое множество: {(айва, 0.956), (банан, 0.959), (гранат, 0.958), (сайра, 0.957)}, где итоговое решение принимается в пользу второго слова-эталона «банан». Таким образом, применение признаков согласных для распознавания слов, привело к повышению точности распознавания.

Выводы

В данной работе предложена модификация метода НФДС, основанного на теории нечетких множеств, учитывающая признаки согласных, которые были выделены с помощью алгоритма машинного обучения на основе приближенных множеств [8]. Показано, что точность распознавания сонорных и звонких согласных достаточно велика и составляет 77% и 76% соответственно (см. табл. 2). Поэтому, выделение признаков может применяться для уточнения решения, полученного не только по методу НФДС, но и по методу ФДС. Применение признаков позволяет сократить количество решений с одинаковыми степенями принадлежности на выходе алгоритма распознавания, за счет чего повышается точность распознавания. Так, точность распознавания для метода ФДС повысилась на 7%, а для метода НФДС – на 4% (см. табл. 3). Таким образом, предложен метод распознавания слов с выделенными признаками согласных, основанный на ранее предложенном методе НФДС [3], который имеет большую точность распознавания по сравнению с традиционным методом ФДС (см. табл. 3).

Литература

1. *Джордж Ф. Люггер.* Искусственный интеллект. М. : Вильямс, 2003. 864 с.

2. *Zadeh L.A.* Fuzzy Sets // Information Control, 1965, Vol. 8, 338–353.

3. *Савченко Л.В., Савченко А.В.* Алгоритм автоматического распознавания фонем на основе логики нечетких множеств в информационной метрике Кульбака – Лейблера. // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. №3. 36–41.

4. *Савченко В.В.* Метод фонетического декодирования слов в задаче автоматического распознавания речи на основе принципа минимума информационного рассогласования // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2009. Вып.5. 31–41.

5. *Kullback S.* Information Theory and statistics, Dover Pub., 1997. 399 с.

6. *Савченко В.В., Акатьев Д.Ю.* Теоретико-информационное обоснование метода обеляющего фильтра в задачах автоматического распознавания речи // Системы управления и информационные технологии. 2008. Т. 31, №1. 21–30.

7. Современный русский язык. В 3-х частях. Ч 1., *Н.М. Шанский, В.В. Иванов.* М. : Просвещение, 1987.

8. *Grzymala-Buss J.W.*, LERS – A system for learning from examples based on rough sets, In: Slowinski R. (ed.), Intelligent Decision Support: Handbook of Application and Advances of the Rough Sets Theory, Kluwer Academic Publishers, 3-18, Dordrecht 1992.

9. *Pawlak Z.*, Rough sets, Proc. On Int. Journal of Information and Computer Sciense, vol. 11, no. 341, 1982.

10. *Сорокин В.Н. , Цыплихин А.И.* Сегментация и распознавание гласных. // Информационные процессы. 2004. Т. 4, №2. 202–220.

Выражение функции полезности интеллектуального агента через саморегуляцию внутреннего состояния

С.М. Садовников, С.В. Моисеев, Е.Д. Казимирова

Независимая исследовательская группа, Москва, Россия
flexferrum@gmail.com; stanislav.moiseev@gmail.com; e.kazimirova@gmail.com; flexai.group@gmail.com

Традиционные подходы к реализации разнообразных интеллектуальных агентов ориентированы на решение конкретных задач или классов задач. В процессе проектирования таких агентов должна быть описана среда, в которой агент будет функционировать, определены показатели производительности агента, описывающие результативность его действий, а также заданы прочие подобные параметры. Для того чтобы привлечь такого агента к решению другого класса задач (или при существенном изменении характеристик среды и, как следствие, *параметров производительности*), требуется его перенастройка и/или перепроектирование, при которых будут учтены имевшие место изменения условий его функционирования.

Для устранения этого недостатка рассмотрим новый тип интеллектуального агента, не привязанного к решению конкретного класса задач. Опираясь на работу [1], определим его следующим образом: *человекоподобная когнитивная система* (ЧКС) – это рациональный самообучающийся интеллектуальный агент без наперёд заданных показателей производительности, действующий в частично-наблюдаемой стохастической последовательной непрерывной мультиагентной среде.

Для оперирования в такой среде рациональный интеллектуальный агент (в нашем случае – человекоподобная когнитивная система) осуществляет планирование, основываясь на максимизации своей функции полезности (ФП). Но поскольку показатели производительности агенту не заданы, выразить *функцию полезности* [1] в атрибутах, описывающих состояние внешней для агента среды, становится слишком сложно, а описать все факторы среды, в которой оперирует агент, – попросту невозможно. Возникает проблема выбора таких атрибутов и критериев, максимизация значений которых может дать приемлемую для агента оценку результата его деятельности в процессе планирования.

Поскольку внешние по отношению к агенту критерии максимизации функции полезности отсутствуют, остается искать их внутри него самого.

Стратегия управления агентом будет заключаться в том, чтобы максимизировать значение функции полезности относительно некоторого набора свойств, тем или иным образом описывающих состояние самого агента, при условии, что на это состояние прямо или косвенно могут влиять изменения во внешней среде.

Описание внутреннего состояния агента. Эмоции

Для того чтобы корректным образом определить описанную выше функцию полезности, необходимо выбрать некоторый набор характеристик, которым будет описываться внутреннее состояние агента.

В такой набор могут входить следующие характеристики:

1. **Целостность**. Это интегральный показатель, описывающий физическую и логическую целостность агента, его «здоровье». Нулевое значение этой характеристики означает полное разрушение (смерть) агента, а максимальное – его абсолютное здоровье.
2. **Удовлетворенность**. Этим интегральным показателем описывается уровень «счастья» системы, уровень её удовлетворённости текущей ситуацией в целом, собственной деятельностью, и т. п. Нулевое значение этого показателя соответствует состоянию глубокой апатии, а максимальное – экстатическому состоянию.

Кроме этих характеристик можно добавить ещё две, которые не являются критериями максимизации ФП, но участвуют в вычислении её значения и, в некоторой степени, являются производными от первых двух:

3. **Сенситивность**. Этим показателем описывается порог реакции агента на фактические или предполагаемые негативные изменения его основных показателей (целостности, удовлетворённости), при которых внутри агента может возникнуть ответная реакция на эти изменения. Нулевое значение сенситивности означает отсутствие реакции агента на любые отклонения в своих показателях, а максимальное – любое (даже самое минимальное) изменения показателей возбуждает в агенте ответную реакцию.
4. **Возбуждённость**. Этим показателем описывается способность агента к совершению той или иной деятельности (готовность и способность решать задачи), или, иначе говоря, его потенциальная энергия. Нулевое значение возбуждённости означает полную подавленность агента, его неспособность к какой-либо деятельности, а максимальное – гиперактивность.

При таком наборе характеристик основная стратегия агента будет заключаться в том, чтобы в каждый конкретный момент времени поддерживать максимально возможные (с учётом прочих

условий) значения своих основных характеристик.

Как было сказано выше, агент на основе такой функции полезности может функционировать должным образом только в том случае, если во внешней среде (или внутри самого агента) будут присутствовать факторы, влияющие на описанные характеристики.

Такие факторы могут быть самыми разнообразными. Это и инновации во внешней среде, воспринятые и проанализированные агентом, и инновации во внутренней среде (результаты самодиагностики оборудования, например), и различные таймауты (промежутки времени, в течение которых агент не выполняет или, наоборот, выполняет те или иные виды деятельности).

Назовём влияние конкретного фактора на ту или иную характеристику состояния системы «воздействием». Тогда можно утверждать, что совокупности воздействий фактора (или нескольких факторов) можно сопоставить ту или иную эмоцию, или эмоциональное состояние. Например:

- Низкий уровень удовлетворённости и высокий уровень сенситивности можно охарактеризовать как *раздражение*. При этом интенсивность этой эмоции будет пропорциональна отклонению соответствующих показателей от нормы;
- Низкий уровень удовлетворённости, высокий уровень сенситивности и возбуждённости можно охарактеризовать как *агрессию*. При этом интенсивность этой эмоции будет пропорциональна отклонению соответствующих показателей от нормы;
- Низкий уровень удовлетворённости и низкий уровень сенситивности можно охарактеризовать как *апатию*;
- Предполагаемое уменьшение уровня удовлетворённости или целостности агента можно охарактеризовать как *страх*. При этом интенсивность этой эмоции будет пропорциональна предполагаемому уровню негативного воздействия на агента;
- Предполагаемое увеличение уровня удовлетворённости при высоком уровне возбуждённости можно охарактеризовать как энтузиазм.

Как можно видеть из приведённых примеров, при формировании ответной реакции на воздействие и при выработке стратегии действий необходимо учитывать такие параметры, как время, когда происходит воздействие (было в прошлом, происходит сейчас, или только предполагается), вероятность воздействия, объект воздействия (воздействие происходит на самого агента, или на другого агента во внешней среде, или на саму среду), и т. п.

Заключение

В свете вышесказанного можно утверждать, что при реализации человекоподобной когнитивной системы нельзя использовать традиционные подходы, основанные на внешних относительно агента параметрах производительности. Поскольку функция полезности такой системы направлена вовнутрь, т. е. выражена в терминах состояния самого агента, а не в терминах среды, в которой он функционирует, то любая задача, которая может быть поставлена перед таким агентом, должна быть выражена в терминах изменения его состояния и никак иначе. В противном случае у агента не будет никакого стимула решать такую задачу.

С одной стороны, это создаёт определенного рода проблемы, так как агент должен быть в прямом смысле заинтересован в решении задач, которые перед ним ставятся. С другой стороны, такой подход позволяет неограниченно расширять спектр задач, которые может решать агент, поскольку нет необходимости каждый раз заново определять функцию полезности агента, подстраивая её под новые классы решаемых задач и параметры производительности.

Литература

1. *С. Рассел, П. Норвиг.* Искусственный интеллект: современный подход, 2-е издание. М. : Вильямс, 2007.

Невербальное поведение мужчин и женщин в эмоциогенных ситуациях

Т.Н. Синеокова

Нижегородский государственный лингвистический университет
tns57@rambler.ru

В последние десятилетия наблюдается возрастающий интерес лингвистов к изучению особенностей вербального и невербального поведения мужчин и женщин. Основной проблемой в такого рода исследованиях является сложность дифференциации собственно биологических и социокультурных факторов, обусловливающих специфику реализации лингвистических и паралингвистических единиц. До настоящего времени довольно часто в лингвистических работах не различались понятия *гендер* как некий варьирующийся социально обусловленный конструкт и *пол* как имманентное инвариантное биологическое свойство, не зависящее от социокультурных факторов.

Поскольку биологические и социокультурные факторы действительно «работают» в комплексе, одной из основных задач исследований в данной области является создание специальных методик, позволяющих в значительной степени, в зависимости от задачи, ослабить ту или иную группу факторов. Подобные методики в последние годы разрабатываются и успешно применяются.

В частности, в основе изучения синтаксической специфики речи мужчин и женщин, обусловленной психофизиологическими факторами, лежит представление о том, что прямое влияние биологического пола на процессы речепорождения может быть обнаружено при измененных состояниях сознания, например, в состоянии аффекта, который служит своеобразным фильтром: он в значительной степени нивелирует влияние различных социокультурных факторов и, таким образом, «высвечивает» факторы собственно биологического характера.

Классификационную базу выделения синтаксических форм составили сорок первичных признаков аффективной речи, являющихся результатом деформации ядерного нейтрального предложения [3]. Данные признаки позволяют не только диагностировать состояние аффекта в целом, но и идентифицировать его конкретные проявления – состояние дистресса, связанное с деформирующим влиянием аффекта на речемыслительные процессы, состояние эвстресса, связанное с благоприятным воздействием аффекта на сознание, и пограничное адаптационное поисковое состояние. Классификация оказалась удобным инструментом для выявления корреляционных связей между полом говорящего и структурными особенностями речи в эмоциогенной ситуации. Исследование показало, что из 40 первичных структурных признаков, реализуемых в состоянии эмоционального напряжения, 19 (т.е. практически половина) коррелируют с мужской или женской речью в состоянии аффекта в целом и в различных формах его проявления – в частности (см. подробнее в [4]). При этом речь мужчин отличается разнообразием деформированных структур. Для нее характерны такие модификации ядерного предложения, как повторы, материально избыточные элементы, инвертированные конструкции, расшифровывающие конструкции, эллипсис, синтаксическая транспозиция, в то время как для женской речи характерны повторы, разрывы потенциального синтаксического целого и синтаксическая транспозиция. Важными представляются и обнаруженные различия в реализации названных модификаций. Так, например, в состоянии дистресса повтор реализуется в диаметрально противоположных формах: мужчины используют эхолалический повтор, женщины – артикуляторные персеверации. Подобные наблюдения, позволяющие выявить определенные закономерности речемыслительной деятельности у мужчин и женщин (для мужчин в состоянии эмоционального напряжения, по-видимому, характерен тормозной тип реакции, для женщин – сверхвозбудимый), могут представлять интерес не только для лингвистов, но и для психологов, нейрофизиологов, лингвокриминалистов.

Дальнейшая дифференциация классификации позволила выявить дополнительные связи между спецификой реализации мужчинами и женщинами в состоянии эмоционального напряжения транспонированных конструкций [2].

В [5] описаны особенности методики, позволяющей исследователям-лингвистам, работающим на материале художественных источников, в значительной степени выделить инвариантную биологическую составляющую на фоне вариативных социокультурных гендерных факторов.

Постулат о фильтрующей роли измененных состояний сознания и упомянутая методика использовались также для выявления корреляционных связей между типом психологического состояний мужчин и женщин и особенностями реализации невербальных компонентов коммуникации. Материалом для анализа послужили 1955 авторских ремарок из драматургических произведений англоязычных авторов.

Экстралингвистической составляющей в данном исследовании являлись не только типы психологических состояний (дистресса, эвстресса и поискового состояния), но и десять психофизиологических механизмов, лежащие в основе их возникновения. Возникновение состояния дистресса обусловлено такими механизмами, как торможение действий и движений, регресс деятельности, пассивно-оборонительная реакция, резкое

снижение организованности поведения (хаотическая модель поведения). В основе поискового состояния лежат ориентировочная реакция (декомпенсация, привыкание), превентивная адаптация, собственно адаптация (поисково-настроечная модель поведения). Состояние эвстресса включает следующие механизмы: агрессивно-оборонительная реакция и локализованная тоническая реакция симпатического отдела ЦНС, отвечающая за появление демонстративной и контактообусловленной модели поведения [1].

Базой для выявления невербальной специфики поведения мужчин и женщин послужила разработанная В.А. Безруковым классификация невербальных компонентов коммуникации, реализуемых в эмоциогенной ситуации [1]. Классификация включает две основные группы элементов: косвенные и прямые номинации измененных состояний сознания.

Средства косвенной номинации дифференцируются на основе изображаемого невербального компонента коммуникации (мимики, позы, жеста, перемещения, голосовых характеристик, тактильного и визуального контакта, манипуляций с предметами, вегетативных характеристик) и психофизиологического механизма реализации.

Средства прямой номинации представлены лексическими единицами, дефиниции которых содержат указание на специфические характеристики различных типов измененных состояний сознания (психофизиологический механизм, интенсивность, динамику, фазу протекания). Особенностью классификации является то, что, базируясь на современных представлениях о функциональных особенностях измененных состояний сознания, она позволяет соотнести – через словарные дефиниции – прямые номинации в художественном тексте с узкоспециальной терминологией, используемой в теории измененных состояний сознания, а также соотнести используемые авторами косвенные номинации со специфическими внешне наблюдаемыми проявлениями измененных состояний сознания.

При этом средства прямой номинации использовались как ключ к определению типа психологического состояния, а в самом прогнозировании участвовали 62 признака косвенной номинации, т.е. особенности мимики, позы, жеста, перемещения, голосовых характеристик, тактильного и визуального контакта, манипуляций с предметами и вегетативных характеристик при разных механизмах протекания эмоциональных реакций в рамках измененных состояний сознания.

Результаты исследования позволяют сделать ряд выводов.

В рамках механизма *торможение действий и движений* диагностически значимыми, причем исключительно для женщин, являются невербальные компоненты, связанные с жестом (руки обхватывают голову, кулак прижимается к голове, руки сомкнуты / безвольно висят; голова закидывается назад / наклоняется вперед); позой (стоит, останавливается / сидит неподвижно в оцепенении / глубокой апатии), манипуляциями с предметами (предмет падает, выпускает из рук / роняет / не может удержать), и вегетативными проявлениями (делает очень длинную паузу, обрывает речь, молчит (как следствие дыхательных нарушений), задыхается; издает хриплые звуки, сипит; спазматический кашель, рыдает). В данном случае интересно сопоставить результаты, полученные при выявлении корреляционных связей между психологическим механизмом и структурными особенностями речи. Выше было отмечено, что, по-видимому, состояние диссоциации может быть связано преимущественно с разными механизмами у мужчин и женщин, в том числе для женщин, возможно, более характерна хаотичная модель поведения. Тем не менее, при работе механизма торможения прогностически значимыми невербальные признаки являются именно для женщин.

Механизм *регресс деятельности* включает как «мужские», так и «женские» признаки. Выявлены значимые корреляционные связи между механизмом и позами (стоит на коленях, простирает руки к небу / просит пощады) и жестами мужчин (поднимает руки вверх, крестится), а также голосовыми характеристиками (переходит на родной / ранее усвоенный язык / диалект) и манипуляциями с предметами (механически пытается собрать листы бумаги, совместить осколки вазы и т.п.) женщин.

При *пассивно-оборонительной реакции* прогностически значимыми для идентификации женщины являются жесты (закрывает / прячет лицо, голову, сердце, живот и т.д.).

В рамках *хаотичной модели поведения* корреляцию с мужским полом обнаруживает такесика (внезапно хватает, долго и с большой силой трясет, поднимает над полом, бьет с невероятной силой).

При *ориентировочной реакции* прогностически значимыми являются локомоции женщин (вскакивает, резко встает/ садится (из положения лежа), поворачивается в сторону раздражителя).

Механизм *превентивной адаптации* позволяет выявить мимические признаки мужчин (лицо искажается (от ярости/злости), подергивается).

Механизм *собственно адаптации* обнаруживает целый ряд прогностически значимых признаков как для мужчин, так и для женщин. В то же время если для мужчин характерным является признак позы (стоит, сидит некоторое время (размышляя); тело становиться напряженным), то для женщин – целый ряд признаков: мимика (сжимает и разжимает руки (ладони), потирает подбородок, жестикуляцией изображает объект, номинация которого вербальными средствами вызывает затруднения), локомоции (ходит по кругу, осторожно идет по направлению к кому-либо.), окулесика (долго и пристально смотрит (в удивлении), осматривается, переводит взгляд с одного объекта / человека на другой(ого)), манипуляции с предметами (приспосабливает предмет (для последующих действий), хватается за предмет) и вегетативные проявления (трясется голова, дрожит, делает

вдох, справляется с дыхательным спазмом, в слезах, почти рыдая).

В рамках *активно-оборонительной реакции* выявлены следующие признаки, значимо коррелирующие с мужским полом: жесты (сжимает кулаки, трясет кулаками), позы (стоит над собеседником, готов вскочить и ударить), локомоции (бросается на / движется угрожающе по направлению к человеку), такесика (смотрит злобно, агрессивно).

При *демонстративной модели поведения* были выявлены значимые для идентификации женщин признаки, затрагивающие мимику (глаза широко открыты, сужаются (произвольно), светятся) и вегетативные проявления (многозначительно вздыхает, начинает плакать, рыдает, плюет с отвращением, трясутся руки.

В рамках *контактообусловленной модели поведения* значимых преференций в реализации невербальных признаков между мужчинами и женщинами выявлено не было.

Основной задачей проведенного исследования являлось установление факта наличия статистически значимых корреляционных связей между используемыми невербальными компонентами коммуникации и полом говорящего. Безусловно, в ходе работы были выявлены лишь основные тенденции реализации невербальных средств мужчинами и женщинами в эмоциогенных ситуациях. Тем не менее предварительные исследования в данном направлении позволяют говорить об их перспективности. В частности, предварительные данные показывают, что особый интерес может представлять сопоставительное изучение особенностей реализации мужчинами и женщинами собственно лингвистических и паралингвистических элементов. Выявленные расхождения в прогностических относительно пола коммуниканта признаках в рамках разных механизмов свидетельствуют о необходимости создания единого, комплексного алгоритма идентификации пола на основе особенностей вербального и невербального поведения.

Литература

1. *Безруков В.А.* Средства номинации измененных состояний сознания в драматургических ремарках (на материале английского языка): дис. … к.ф.н. / НГЛУ. Нижний Новгород, 2007.
2. *Лисенкова О.А.* Синтаксическая транспозиция в мужской и женской аффективной речи (на материале английского языка): дис. … к.ф.н. / НГЛУ. Нижний Новгород, 2007.
3. *Синеокова Т.Н.* Парадигматика эмоционального синтаксиса: монография. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2003.
4. *Синеокова Т.Н.* Идентификация пола говорящего по конструктивным особенностям речи в состоянии эмоционального напряжения (на материале английского языка) // Теоретические и прикладные аспекты изучения речевой деятельности: Сборник научных статей. Вып. 1. Нижний Новгород: НГЛУ им. Н.А. Добролюбова, 2006. С. 34–40.
5. *Синеокова Т.Н.* Интерактивные лингвистические классификации: статистические методы анализа: монография. Нижний Новгород: НГЛУ им. Н.А. Добролюбова, 2009.

Влияние информационных характеристик словесного стимула на эффективность его опознания

М.С. Сопов

Санкт-Петербургский государственный университет
mihail-sopov@mail.ru

Вопрос о достаточных условиях (порогах) опознания стимула является одним из ключевых в психологии восприятия, однако ответ на него не дан и по сей день. По сути, это вопрос о том, какое количество информации необходимо для того, чтобы конкретный зашумлённый стимул S` был опознан как ранее запечатлённый в опыте стимул S. Для изучения психофизических порогов опознания необходимо использовать, во-первых, ряд стимулов S1, S2, S3..., мнемические коды которых являются эталонами для опознания (это могут быть уже хранящиеся в памяти репрезентации, например изображения предметов быта, названия животных), во-вторых, ряд стимулов S1`, S2`, S3`..., являющихся определённым образом зашумлёнными в зависимости от задач исследования. Именно последние и выступают в качестве стимульного материала. Характеристика ряда стимулов S1`, S2`, S3`... (к примеру, чёткость изображения, расположение букв в слове и т.д.) будет значима для опознания каждого конкретного стимула в том случае, если её варьирование покажет наличие некоторого порогового значения, превышение которого ведёт к резкому изменению эффективности опознания.

В многочисленных исследованиях показано, что варьирование различных характеристик экспериментальных стимулов (S`) по-разному влияет на успешность опознания. Так, была описана линейная зависимость между степенью общей зашумлённости контурного изображения и эффективностью его опознания [1, 2], между размерами деформированного изображения и эффективностью его опознания [3]. С другой стороны, И. Бидерманом было показано, что при одинаковой степени общей зашумлённости контурные изображения опознаются с разной эффективностью в зависимости от того, какие части контура удалены [4]. Все описанные исследования проведены с использованием контурных рисунков в качестве стимульного материал. При обобщении их результатов можно прийти к выводу о неоднородности влияния различных частей контура на процесс опознания изображения. Этот вывод можно экстраполировать и на стимулы других модальностей.

Таким образом, вопрос о влиянии информационных характеристик стимула на эффективность его опознания это, по сути, вопрос о расположении информационно значимых элементов (перегибов контура, сочетаний звуков и т.д.) в структуре стимула. Нами было выдвинуто предположение о том, что информационная значимость различных элементов стимула конкретной модальности (зрительной, слуховой, тактильной) определяется особенностями сенсорной системы, в которой происходит обработка информации данной модальности. В качестве стимульного материала мы использовали слова с различной длиной фонетического ряда. Так как последовательность фонем является одномерной структурой (то есть фонемы следуют одна за другой лишь в одном направлении), в ней легче определять информационно значимые компоненты. Р. Конрадом было показано, что независимо от того, предъявляются ли слова на слух или визуально, ошибки при воспроизведении запомненных слов происходят на основе аудиальных признаков [5]. Опираясь на полученные данные, автор делает вывод о ведущей роли слуховой системы при обработке словесных стимулов. Позднее было продемонстрировано, что визуальное восприятие слов имеет свою специфику по сравнению с аудиальным, однако это не умаляет значения слуховой системы при обработке вербальной информации. Исходя из этого, можно сделать предположение, что информационно значимой характеристикой словесных стимулов должна быть последовательность фонем в слове. Поэтому первая проверяемая нами гипотеза звучит так: длина фонетического ряда стимулов S` является значимой для опознания характеристикой словесных стимулов. То есть существуют пороговые значения длины фонетического ряда, при превышении которых вероятность опознания слова резко повышается. Вторая гипотеза, проверка которой правомерна только в случае подтверждения первой гипотезы: длина фонетического ряда исходного стимула Si не влияет на вероятность опознания стимула Si`, поскольку, как показано в известных экспериментах Г.А. Миллера, количество составных единиц каждого конкретного стимула не влияет на количество сохраняемых в памяти стимулов [6]. За счёт имеющегося опыта наборы элементов перекодируются в более крупные единицы, эффективность запоминания которых не зависит от количества элементов, входящих в их состав.

Для проверки гипотез был проведён эксперимент, в котором испытуемым на экране компьютера в случайном порядке предъявлялись различные слова с инструкцией их запомнить, а затем назвать экспериментатору по первым буквам. Эксперимент состоял из двух частей – в первой предъявлялись короткие слова (4–6 букв: напр., «ШКАФ», «УКРОП»), во второй – длинные слова (8–12 букв: напр. «ДИНОЗАВР», «ШТУКАТУРКА»). Для воспроизведения – также в случай-

ном порядке – предъявлялась либо одна первая буква, либо сочетания из двух или трёх букв от каждого слова. Выполнение основного эксперимента предваряло тренировочное задание, которое заключалось в опознании по первым буквам 9 слов. Оно было необходимо для снижения эффекта неопределённости. Две последующие основные серии состояли из 21 слова каждая. Одно слово предъявлялось на 1 секунду, после чего следовала пауза в 2–2,5 сек. Фиксировались количество правильных ответов и время от предъявления стимула до ответа испытуемого.

В эксперименте приняли добровольное участие 50 человек, из них 38 женщин и 12 мужчин в возрасте от 18 до 30 лет, с нормальным или скорректированным до нормального зрением, свободно владеющие русским языком.

Для обработки результатов эксперимента применялся метод двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и апостериорный критерий попарных сравнений Post Hoc, выполненные в программе «StatSoft STATISTICA 8».

Было установлено, что усреднённое время ответов испытуемых при опознании экспериментальных стимулов (S`) не является показателем эффективности опознания. Статистически значимых различий между временем опознания различных стимулов выявлено не было. Однако анализ качества опознания (количество правильных ответов при предъявлении различных стимулов) дал более интересные результаты. Существует статистически достоверное различие между показателями успешности опознания словесных стимулов с коротким и длинным фонетическим рядом по двум буквам ($p = 0{,}000002$). В то время как между показателями успешности по одной и трём буквам статистически достоверных различий не обнаружено ($p = 0{,}999975$ и $p = 0{,}149763$ соответственно). Это различие демонстрирует рис. 1.

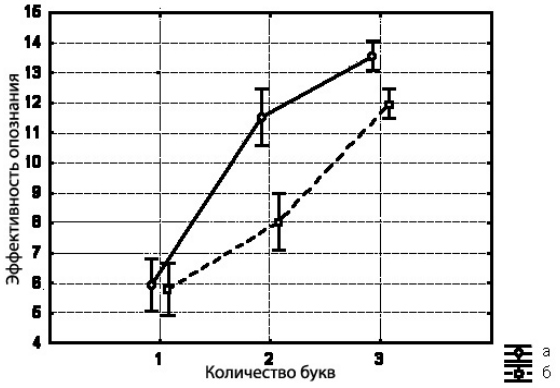


Рис. 1. Зависимость эффективности опознания стимульного слова (S`) от количества содержащихся в нём букв. *а* – слова из 4–6 букв, *б* – слова из 8–12 букв

Полученные результаты подтверждают гипотезу №1, так как демонстрируют наличие статистических порогов опознания стимулов S` (2 буквы для слов с коротким фонетическим рядом и 3 буквы для слов с длинным фонетическим рядом). Это свидетельствует о том, что длина фонетического ряда стимула S` является значимой для опознания характеристикой. Однако они противоречат гипотезе №2, так как пороги опознания стимулов S` различны для слов с коротким и длинным фонетическим рядом.

Подобное противоречие нельзя интерпретировать так, будто испытуемые хуже запоминают длинные слова, чем короткие. Запоминаются они одинаково: об этом свидетельствуют результаты экспериментов Г.А. Миллера, а также наши собственные, полученные на описанном выше стимульном материале (при последовательном запоминании двух наборов слов – длинных и коротких – испытуемые в среднем воспроизводят 14 слов из того и другого набора; сходство статистически достоверно: $p = 0{,}046045$ на выборке в 34 человека). Это означает, что объяснить полученные результаты можно только влиянием на процесс опознания характера мнемического кода стимула S. То есть порог опознания конкретного стимула Si` зависит как от его собственных характеристик, так и от характеристик закреплённого в памяти кода стимула Si. Если брать набор стимулов S1`, S2`, S3`…, то для каждого из них психофизический порог, помимо собственных характеристик, будет определяться и всей структурой памяти данного конкретного индивида. Другими словами, этот вывод отражает известный в психологии факт, описанные ещё С.Л. Рубинштейном: «Все психические процессы протекают в личности, и каждый из них в своем реальном протекании зависит от неё» [7; 680]. Здесь встаёт закономерный вопрос: как изучать пороги опознания с учётом влияния на них содержания памяти индивида? Похоже, что для этого необходим поиск общих закономерностей взаимодействия стимула и его мнемического кода, что подразумевает разработку проблемы на уровне мозговых механизмов формирования индивидуального опыта.

Литература

1. *Меркульев А.В., Пронин С.В., Семёнов Л.А., Фореман Н., Чихман В.Н., Шелепин Ю.Е.* Пороговое отношение сигнал/шум при восприятии фрагментированных фигур // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2004. Т. 90, №11. С. 1348–1355.

2. *Назаров А.И., Бардина Ю.Д.* Узнавание неполных контурных изображений // Психологический журнал Международного университета природы, общества и человека «Дубна». 2012. № 4. С. 32–45.

3. *Меркульев А.В., Шелепин Ю.Е., Чихман В.Н., Пронин С.В., Фореман Н.* Оптико-геометрические характеристики и пороги восприятия фрагментированных фигур // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2003. Т. 89, №6. С. 731–737.

4. *Biederman I.* Perceiving real world scenes // Science. 1972. V. 177. P. 77-80.

5. *Conrad R.* Acoustic confusions and memory span for words // Nature. 1963. V. 197. P. 1029–1030.

6. *Miller G. A.* The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information// Psychological Review. 1956. V. 63 (2). P. 81–97.

7. *Рубинштейн С. Л.* Основы общей психологии. СПб. : Питер, 1998. 720 с.

Моделирование когнитивных функций навигационного поведения в интеллектуальной системе робота

Л.А. Станкевич

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Stankevich_lev@inbox.ru

Поведение животных и людей в реальной динамически изменяющейся среде формируется многими структурами мозга. Одним из наиболее сложных видов поведения является пространственная навигация, позволяющая организму определять свое местоположение в трехмерном окружении и организовывать перемещение в нем по целевой траектории. Такая навигация является главной и общей когнитивной способностью животных и людей. В нейрофизиологии и когнитивной науке показано, что навигационные задачи решаются гиппокампально-энторинальной системой мозга, которая реализует важнейшие когнитивные функции построения карты окружения и локализации в ней организма.

В последнее время большое внимание уделяется разработке роботов с интеллектуальным управлением, функционирующих в реальных средах. Такие роботы должны быть способны формировать сложное навигационное поведение. Особенно это важно для антропоморфных или гуманоидных роботов, поскольку они должны функционировать в динамически изменяемой среде (квартира, офис, производственные помещения и пр.) совместно с людьми или роботами.

В данной работе обсуждается возможность моделирования некоторых когнитивных функций навигационного поведения в интеллектуальной системе антропоморфного робота. Предполагается, что эти функции могут повысить эффективность навигационного поведения робота при функционировании в среде с динамическими препятствиями.

Навигационное поведение и его реализация

Когда животные и люди исследуют новую среду, они вспоминают фрагментарно места, которые они посетили. Они используют эти знания, чтобы найти путь домой. Животные развили для этого разные методы, которые используют два вида ключевой информации: дистанцию и ориентацию. Люди естественно используют более мощные методы, которые зависят от того, как они чувствуют среду. Эти методы нужны, чтобы формировать сложное навигационное поведение организма.

В основе навигационного поведения лежат когнитивные функции построения карты окружения и самолокализации организма в ней. Предполагается, что первая функция создает в мозгу животных и людей так называемые «когнитивные карты». Важная характеристика этих карт – искаженная информация о дистанциях, маркерах, местах и путях, иерархической организации, а также множественных ссылках. Были предложены модели когнитивных карт, например, в виде некоторой сети представления места. Функция локализации организма в окружении решает проблему идентификации себя в пространстве, что в значительной степени связано не только с когнитивными функциями сенсорного восприятия, но и когнитивными механизмами сознания. Эта функция реализуется бодрствующим мозгом постоянно.

Изучение нейродинамики таких специализированных структур мозга, как энторинальная кора и гиппокампальная формация, показало, что они напрямую связаны с пространственной и эпизодической памятью [1]. Кроме того, это позволило выявить то, как организмы запоминают навигационные траектории и формируют когнитивные карты окружения. Предполагается, что главным компонентом пространственной навигации является гиппокамп. Активность в левом и правом гиппокампе соответствует разным представлениям пространственной информации: последовательные эгоцентрические представления в левом гиппокампе и аллоцентрические представления в правом гиппокампе [2]. Основная роль принадлежит клеткам места, активность которых поддерживает аллоцентрическое представление текущего положения организма в его окружении, но также учитывает события, связанные с последовательным эгоцентрическим представлением. Кроме того, важным аспектом кодирования места в гиппокампе является топологический принцип в изменении активности полей нейронов в соответствии с изменением геометрии среды.

Когнитивные и семантические модели окружения

В последнее время развиваются исследования по использованию когнитивных карт для навигации мобильных роботов. Эти средства пришли на смену методам локализации и картирования окружения робота SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [3]. Карты, получаемые методом SLAM, являются точными, поскольку положение каждого объекта, который ощущает робот, вспоминая его позицию, определяется с помощью достаточно точных сенсоров. В контрасте с этим процесс когнитивного картирования, используемый животными и людьми, производит изначально неточную карту, которая далее превращается в представление, дополненное их собственной интерпретацией и опытом познания окружения.

Семантические модели окружения являются другой формой представления окружения. В литературе такие модели известны как SSH (Spatial Semantic Hierarchy) – пространственная семантическая иерархия [4]. В этих моделях окружение робота описывается с учетом иерархии объектов исследуемой местности в терминах названий этих объектов и семантических отношений между ними. Например, в такой модели указывается вложенность одного объекта в другой стандартными семантическими отношениями HAS-PART или PART-OF. Могут использоваться и другие отношения, показывающие взаимное расположение объектов: Объект-1 расположен справа от Объекта-2 или близко к Объекту-2. Такие семантические отношения не являются точными, но позволяют роботу организовать свои действия более рационально.

Для навигации робота в среде с препятствиями может быть использован метод когнитивного картирования, совмещенный с семантической моделью окружения. Например, если робот получает визуальную информацию от своей системы стереозрения, он воспринимает окружение, распознавая объекты, которые видит, и строя картину глубины, грубо показывающую расстояния до этих объектов. Так образуется пространственный вид окружения.

В процессе когнитивного картирования используется полученный пространственный вид и конструируется описание локального пространства, в котором робот располагается и которое он воспринимает в данных момент. При перемещении робота картина восприятия меняется и формируется описание нового локального пространства. Так создается сеть локальных пространств по всему маршруту робота. Дополнительно формируется пространственная семантическая иерархия местности, исследованной роботом. Сеть локальных пространств, дополненная пространственной семантической иерархией, представляет собой когнитивную карту исследованного пространства. Эта карта позволяет роботу локализовать себя в этом пространстве и находить обратный путь даже при малой точности снятых с помощью системы зрения координат объектов.

Вариант реализации навигационного поведения робота

В большинстве случаев система управления мобильного робота должна решать задачи построения маршрута и траекторного управления движением до искомого объекта в среде. Эта задача существенно усложняется в среде с динамическими препятствиями. Предполагается, что существует достаточная информация для построения не очень точной карты окружения с предполагаемым местом нахождения объекта, к которому должен подойти робот.

Первая задача системы – построение карты окружения робота в виде навигационной сети, позволяющей быстро решить задачу передвижения между двумя любыми пригодными для движения и доступными точками пространства. Вторая задача – разработка маршрута поиска объекта. Ищется наиболее рациональный маршрут для выполнения задачи поиска объекта. При этом проводится условная оптимизация траектории за счет подключения информации о физических свойствах препятствий и локальной оптимизации траектории на основе данных, поступающих из окружающей среды. Третья задача – навигация и траекторное управление движением по маршруту в динамической среде с препятствиями. При этом контролируется движение робота по маршруту, осуществляется идентификация статических и динамических препятствий и слежение за ними. Маршрут изменяется в случае вынужденного отклонения либо выявления новых препятствий.

Представим картографическую информацию в виде множества значений функции двухмерного вектора:

$$f_i = S(x_i, y_i).$$

Построим когнитивную карту в виде навигационной сети и связанного с ней графа. Для этого необходимо сформировать оператор отображения из пространства множества значений функции проходимости $F\{f_i\}$ во множество графов навигационной сети $N(n_j)$, используя разбиение множества проходимых значений $f_i \in (h_{\min}, h_{\max})$, на подмножества, аппроксимируемые выпуклыми многоугольниками, где $(h_{\min}, h_{\max})$ – допустимые значения функции проходимости. Это позволит нам построить искомое отображение:

$$F(f_i) \to N(n_j).$$

Далее, после получения начальных условий поиска, необходимо найти среди множества путей обхода возможных обходов графа $P(p_i)$ путь, минимизирующий значение функционала расхода ресурсов и времени $R(p_i, t)$, т. е.

$$p_{opt} \xrightarrow[\min]{} R(p_i, t).$$

Кроме того, дополнительным условием является наличие решения в любой момент времени после получения роботом задания.

Так как навигационная сеть состоит из выпуклых многоугольников, то для успешного поиска неподвижного объекта необходимо и достаточно, чтобы p_{opt} проходил через все вершины графа.

Для представления карты окружения в виде графа используется полигональное разбиение карты проходимости. Сначала карта проходимости анализируется и разбивается на области различных значений функции проходимости (связные области с одинаковым, в пределах погрешности, значением). Для этого используется алгоритм сегментации. Сегментация основана на использовании локальных признаков изображения и ведется методом наращивания областей с некоторым пороговым значением отклонения. Выбираются стартовые точки и анализируются соседние с ни-

ми в соответствии с критерием однородности значений функции. Далее соседние точки зачисляются в ту или иную группу. При этом кроме дескрипторов может использоваться дополнительная информация о смежности и связности областей. Далее границы каждой выделенной связной области аппроксимируются сплайнами, и карта проходимости преобразуется в набор «многоугольников», каждый из которых представляет собой ограниченную область с известным значением проходимости (рис. 1).

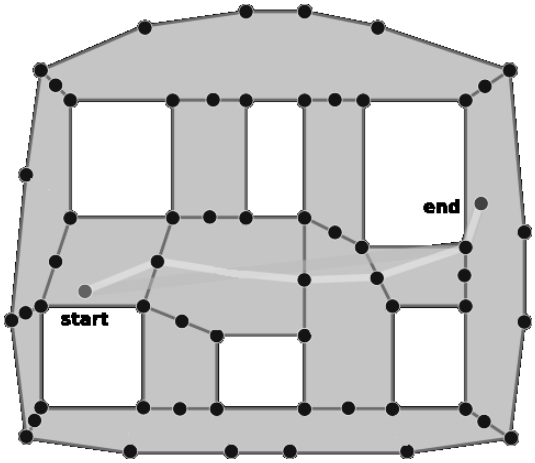


Рис. 1. Навигационная сеть

Полученную навигационную сеть легко представить в виде связного графа, где вершинами графа являются полигоны проходимости, а ребра – общие грани полигонов. Так как все полигоны выпуклые, то задача поиска представляет собой задачу обхода всех вершин графа из заданной вершины наикратчайшим путем. Основная сложность заключается в том, что стоимость прохода через вершину, вообще говоря, зависит от пройденных до этого точек, а точнее она зависит от точки входа и выхода из полигона. С целью упрощения поиска при создании навигационной сети можно использовать большее количество многоугольников, делать их по форме ближе к квадратам и считать, что стоимость ребра равна расстоянию между центрами полигонов инцидентных вершин.

Моделирование навигационного поведения в игровой среде

Для проверки эффективности рассмотренного подхода проведено моделирование навигационного поведения роботов в игровой среде футбола роботов. Полученные результаты являются обнадеживающими в плане достижения в ближайшем будущем уровня командной работы роботов, превышающего существующий уровень игры гуманоидных роботов в футбол.

Для примера на рис. 2 представлен фрагмент игры роботов-футболистов. Здесь команда слева выигрывает за счет того, что управляется с помощью специальной программы, реализующей навигационное поведение роботов по изложенным в этой работе принципам.

Рис. 2. Фрагмент игры

Заключение

В данной работе показана возможность моделирования в интеллектуальной системе робота когнитивных функций локализации и картирования окружения при разных условиях функционирования. Эти функции включены как базовые в модель когнитивного процесса формирования поведения, которая опробована на примерах управления навигационным поведением антропоморфного робота в игровой среде футбола роботов. Моделирование подтвердило эффективность предложенного подхода.

Литература

1. *Цукерман В.Д.* Мозг, память, навигация. Материалы XV международной конференции по нейрокибернетике, Том 3. Ростов-на-Дону, Изд-во ЮФУ, 2009, с. 201–231.

2. *Цукерман В.Д. и др.* Два гиппокампа – две когнитивные стратегии навигации // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2011. Труды конференции. Нижний Новгород, 2011, с. 218–221.

3. *Yeap W.K.* From Spatial Perception to Cognitive Mapping: How is the Flow Information Controlled? Association for the Advancement of Artificial Intelligence, 2007 (www.aaai.org).

4. *Schmidt J. et al.* Spatial Information Extraction for Cognitive Mapping with Mobile Robot. COSIT 2007. LNCS 4736, Springer-Verlag, 2007, p. 186–202.

Значение когнитивных расстройств у детей школьного возраста с вегетативно-сосудистой дистонией

Е.Ю. Степанова, Т.М. Радаева, В.И. Борисов, Г.М. Данильцева, Т.М. Прыгунова

ГБОУ ВПО «Нижегородская государственная медицинская академия Росздрава», Нижний Новгород
p-tanchita@yandex.ru

Введение

Когнитивные расстройства в детском возрасте остаются одной из наиболее актуальных медико-социальных проблем современной медицины. Дисфункция психоневрологического развития отмечается у 30–56% здоровых школьников. Психосоциальное развитие ребенка, адаптируясь через параметры высших психических функций, имеет ряд характеристик этого процесса – когнитивных (познавательных) и аффективных (эмоциональных, поведенческих) [6, 7].

В неврологии и нейропсихологии под когнитивными функциями принято понимать наиболее сложные функции головного мозга, необходимые для осуществления процесса рационального познания мира. К таким функциям относятся восприятие информации (гнозис), ее анализ и обработка (так называемые исполнительные функции), хранение информации (память) и передача информации (праксис и речь).

О когнитивных нарушениях говорят в тех случаях, когда отмечается ухудшение в одной или более из вышеуказанных сфер по сравнению с преморбидным уровнем, т. е. снижение внимания, памяти, мнестико-интеллектуальных способностей относительно индивидуальной нормы для данного пациента [13, 14].

Наиболее часто в практике детского невролога когнитивные расстройства в своем большинстве являются конечным результатом неблагоприятных мультифакториальных процессов, воздействующих на плод и аномальную конституцию будущего ребенка. Расстройство функций может выражаться в нарушении памяти, внимания, психомоторной координации, речи, гнозиса, праксиса, счета, мышления, ориентации, планирования и контроля психической деятельности.

Инвалидизация ребенка происходит в результате значительного ограничения его жизнедеятельности в период формирования высших психических функций, усвоения знаний и умений, в период становления личности. Это приводит к социальной дезадаптации вследствие нарушения развития и роста ребенка и накладывает ограничения не только на проявление личности ребенка, но и на ее формирование.

Адаптирующее действие на высшие психические функции оказывает вегетативная нервная система.

Результирующим фактором является совокупность патологических нейрофизиологических механизмов, среди которых важное значение имеют сдвиги в работе вегетативной системы, что в свою очередь дисгармонирует нормальное развитие ребенка и способствует формированию когнитивного дефицита.

Нарушения в работе вегетативной нервной системы служат диагностической базой уровня глубины любого когнитивного расстройства, выражаясь клинически психосоматической патологией растущего организма.

Дисфункция вегетативной нервной системы часто приводит к такому многогранному заболеванию, как вегетативно-сосудистая дистония, которую выявляют у 25–80% детей. Поэтому своевременное выявление и ранняя коррекция вегетативной дистонии поможет избежать неврологических и соматических осложнений, а также улучшить качество жизни ребенка.

Материалы и методы

Исследована группа школьников из 30 человек (15 мальчиков, 15 девочек) от 10 до 16 лет с вегетативно-сосудистой дистонией. Все дети имели отягощенный анамнез внутриутробного развития. У всех матерей была патология беременности и родов – угроза прерывания, анемии и пиелонефриты, гестозы первой и второй половины беременности, стимуляция родовой деятельности, родоразрешение путем кесарева сечения и др. Все дети на первом году жизни наблюдались неврологом с диагнозом перинатальная энцефалопатия средней степени тяжести.

При поступлении основные жалобы были на головные боли разной степени выраженности, обмороки, головокружения, сердцебиения, нарушения сна, снижение памяти и концентрации внимания, повышенную возбудимость и быструю утомляемость, эмоциональную лабильность, чувство напряжения и боли в шейном отделе позвоночника, нарушение осанки.

В неврологическом статусе – очаговая микросимптоматика в виде оживления сухожильных рефлексов с расширением рефлексогенных зон и наличия патологических рефлексов с рук, болезненность при пальпации паравертебральных точек в шейном отделе позвоночника. Нарушение вегетативной регуляции выражалось в повышенной потливости ладоней и стоп, мраморности кожи, изменении сальности кожи, красном стойком дермографизме и др.

Нами была разработана формализованная карта специально для детей школьного возраста, которые предъявляли жалобы на нарушение внимания и памяти и наблюдались с диагнозом вегетативно-сосудистая дистония. Обследование проводилось в виде анкетирования родителей и детей.

Объективизация вегетативного статуса произведена методом нейрокардиоинтервалографии (НКИГ), основанном на анализе интегральной оценки активности симпатической и парасимпатической нервной системы, что дает возможность мониторировать изменения вегетативного тонуса и корректировать терапию в процессе лечения. Оценивались следующие вегетативные показатели: Мо, АМо, вариационный размах, индекс напряжения (Баевского). Мо – мода – это наиболее часто встречающаяся в данном динамическом ряде значение кардиоинтервала, характеризует гуморальный канал регуляции ритма сердца. АМо – амплитуда моды – это число кардиоинтервалов, соответствующих значению моды, в % к объему выборки, характеризует активность симпатического отдела ВНС. MxDMn – вариационный размах – отражает степень вариативности значений кардиоинтервалов в исследуемом динамическом ряду, характеризует активность парасимпатического отдела ВНС. Индекс напряжения (Баевского) – AMo/(2*Mo*MxDMn), суммарный показатель, наиболее полно отражающий степень напряжения регуляторных механизмов организма, уровень управления за централизацией кровообращения.

Все дети были обследованы двукратно – в начале лечения и после его окончания, некоторые из них обследованы более двух раз для коррекции терапии в процессе лечения. Исследование детей проводилось с последовательной сменой трех положений:

I – лежа,

II – сидя с наклоном головы вперед,

III – сидя с наклоном головы назад.

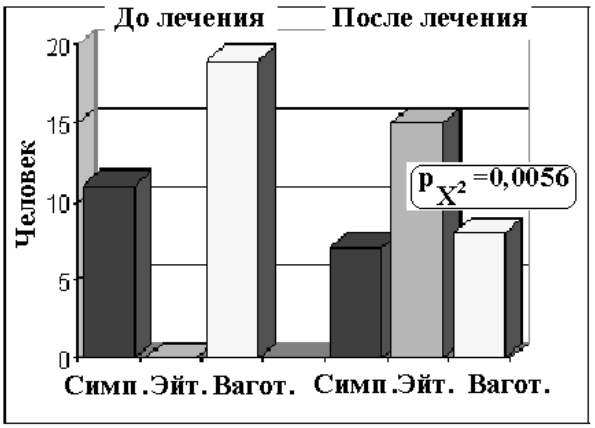
При анализе результатов использован метод X^2. Достоверность сдвига считать при $p < 0{,}0054$.

Все пациенты получали стандартную фармакотерапию пирацетамом с витаминами группы В в комбинации с физиотерапевтическим воздействием.

Результаты

На фоне проводимого лечения у всей группы обследуемых клинически наблюдалась положительная динамика в виде уменьшения интенсивности цефалгий и цервикалгий, снижение частоты головокружений, нормализация сна, повышение работоспособности, уменьшения потливости ладоней и стоп. По данным анкетирования родителей и детей практически у всей группы сохранялись жалобы на нарушение концентрации внимания и снижение памяти.

При обследовании детей методом НКИГ в начале лечения в положении I больше половины группы имели ваготонию – 19 человек (63,3%), 11 (36,7%) – симпатотонию. Детей с эйтонией выявлено не было. При переходе в положение II произошло изменение вегетативной регуляции с повышением активности симпатической нервной системы – группа с ваготонией уменьшилась до 11 человек (36,7%) с переходом в эйтонию – 4 (13,3%). Группа с симпатотонией увеличилась до 15 (50,0%) за счет перехода 4 человек (13,3%) из ваготоников. При смене положения в III произошло изменение вегетативного тонуса практически с возвратом к первоначальному – группа с ваготонией составила 17 человек (56,7%), эйтония выявлена у 2 (6,7%), количество детей с симпатотоний вернулось к исходному уровню – 11 человек (36,7%).



По результатам НКИГ проводимого после окончания курса лечения реакция на перемену положений тела наблюдалась менее выраженная. В положении I группа с ваготонией составила 14 человек (46,7%), с симпатотонией – 9 (30%), с эйтонией – 7 (23,3%). В положении II наблюдался переход из ваготонии в эйтонию 3 детей (10%), симпатотоники остались без изменения. В III положении произошла более выраженная компенсация вегетативного тонуса, чем у детей до лечения, переход в эйтонию наблюдался у 15 человек (50%), группа с ваготонией сократилась до 8 человек (26,7%), с симпатотонией проявила меньшие компенсаторные возможности – 7 (23,3%), с переходом в эйтонию от начала лечения всего у 4 человек (13,3%). Сдвиг для ваготоников и нормотоников достоверен ($p = 0{,}0056$).

Заключение

Полученные данные отражают стадийность патологического процесса, где вегетативный статус четко реагирует на любые изменения в организме ребенка.

Анализируя результаты до интегративно-восстановительной терапии можно судить, что компенсаторные возможности у детей с вегетативно-сосудистой дистонией и наличием когнитивного дефицита выражены слабо, характеризуются большой лабильностью вегетативных сдвигов.

На фоне проводимого лечения состояние ваготонии свидетельствует о начальных и эффективно корректируемых стандартной терапией изменениях в организме, а симпатотония свидетельствует о более глубокой патологической реакции и нуждается в поиске новых методов лечения.

Важно отметить, что наличие когнитивного дефицита зафиксированного у всех детей как до

так и после лечения нуждается в тщательном нейропсихологическом исследовании и комбинированной коррекции различными специалистами. Следовательно, своевременная диагностика когнитивных и неврологических нарушений, уровня компенсаторных (потенциальных) возможностей, адекватная медико-психологическая помощь в значительной мере снижают степень инвалидизации и повышают социальные возможности ребенка в аспекте обучения, социального контакта.

Все вышеизложенное определяет задачи когнитивной неврологии детского возраста, имеющей междисциплинарный характер и охватывающей все стороны жизни ребенка [4, 5].

Литература

1. *Анохин П.К.* Системные механизмы высшей нервной деятельности. М., 1979.
2. *Бадалян Л.О.* Детская неврология. М., 1981; 416 с.
3. *Забрамная С.Д.* Психолого-педагогическая диагностика умственного развития детей. М., 1995; 112.
4. *Лурия А.Р.* Основы нейропсихологии. М., 1991, 374 с.
5. Справочник психологии и психиатрии детского и подросткового возраста / под ред. *С.Ю.Циркина*. СПб. : Питер, 2000. 722.
6. *Кубрякова Е.С., Демьянков В.З.* и др. Краткий словарь когнитивных терминов. М., 1996. 245.
7. *Дюк В.А.* Компьютерная психодиагностика. СПб., 1994. 364.
8. *Маслова О.И.* Тактика реабилитации детей с задержками нервно-психического развития // Русский медицинский журнал 2000. 8(18). 746–8.
9. *Маслова О.И., Студеникин В.М.* и др. Когнитивная неврология // Российский педиатрический журнал. 2000. 5. 40–1.
10. *Liu Y., Wang Y.* Cognitive functions of children with attention deficit/hyperactivity disorder. Zhonghua Yi Za Zhi Xue. 2002; 82(6): 389–92.
11. Физиология роста и развития детей и подростков (теоретические и клинические вопросы) / под ред. А.А. Баранова, Л.А. Щеплягиной. М., 2000. 584.
12. *Conners C.K.* Nootropes and food. In: Practitioner's guide to psychoactive drugs for children and adolescents / J.S.Werry, M.G.Aman, eds. NY., 1993. 373–89.
13. *Гнездицкий В.В*. Вызванные потенциалы мозга в клинической практике. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. 252 с.
14. *Mishkin M., Suzuki W., Gadian D.G., Varha-Khadem F.* Hierarhicai organization of cognitive memory // Phi. Trans. R. Soc. bond. B. 1997. Vol. 352. P. 1461–1467.
15. Способ диагностики вегетативных дисфункций Патент на изобретение №:2242923. Авторы: Радаева Т.М. (RU) ,Капля Э.И. (RU),Трушина И.А. (RU), Куркина С.А. (RU), Радаев М.А. (RU) Дата публикации: 27 декабря 2004.
16. Способ лечения вегетативных дисфункций у неврологических больных. Патент на изобретение №: 2250749. Авторы: Радаева Т.М. (RU), Капля Э.И. (RU) Борисов В.И. (RU), Трушина И.А. (RU), Куркина С.А. (RU), Радаев М.А. (RU). Дата публикации 27 апреля 2005.
17. Способ исследования вегетативной реактивности. Патент на изобретение №: 2237431. Авторы: Радаева Т.М. (RU), Капля Э.И. (RU), Трушина И.А. (RU), Куркина С.А. (RU), Радаев М.А. (RU). Дата публикации: 10 октября 2004.

Семантический анализ изображений

А.А. Тельных, О.В. Шемагина

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород
olgashemagina@gmail.com

Зачастую, чтобы облегчить поиск нужной графической информации в больших базах данных изображений, используют формальное внешнее описание этих данных, которое называется метаданными. Сигнатуры изображений в каком-то смысле тоже могут быть рассмотрены как метаданные, так как являются формальным внешним, по отношению к изображению, его описанием. Сигнатуры изображений, в форме метаданных, зависят только от алгоритма формирования сигнатуры и от самих изображений.

В рамках данной работы мы предлагаем преодолеть семантический разрыв между математическим и смысловым описанием изображения, используя методики «семантического анализа изображений».

Автоматическое описание (индексирование) базы данных изображений. В приложении к изображениям семантический анализ заключается в обозначении некоторых областей или всего изображения единицами естественного языка.

Инструментом, который способен автоматически обозначить некоторую область изображения, является детектор [1, 2]. Природа детектора может быть произвольной – нейросетевой, каскадной, на основе цвета или анализа контуров, анализа текстур и так далее. Важно его свойство локализации понятия на изображении, с которым он связан. Детектор указывает, что в этой области находится нечто, описываемое именем существительным, с которым он связан.

Существенное расширение функциональности предлагаемой системы нам дает анализ свойств локализованных детектором областей. Свойства найденной детектором области изображения обозначает детектор атрибутов [3], который описывает некоторые признаки области именем прилагательными. Таким образом, мы имеем связь между понятием, его свойствами, детектором, детектором атрибутов и областью на изображении. Эта связь является основой семантического анализа изображений, который выполняется в рамках данной работы.

Банк всевозможных детекторов, т. е. несколько детекторов, анализирующих изображение одновременно, соответствуют контролируемому словарю системы семантического анализа изображений. Объем словаря говорит о возможностях системы семантического анализа изображений. Очевидно, что чем больше словарь по объему, тем более полным будет сам семантический анализ. Первичным результатом семантического анализа изображений является таблица, которую назовем семантической сигнатурой изображения.

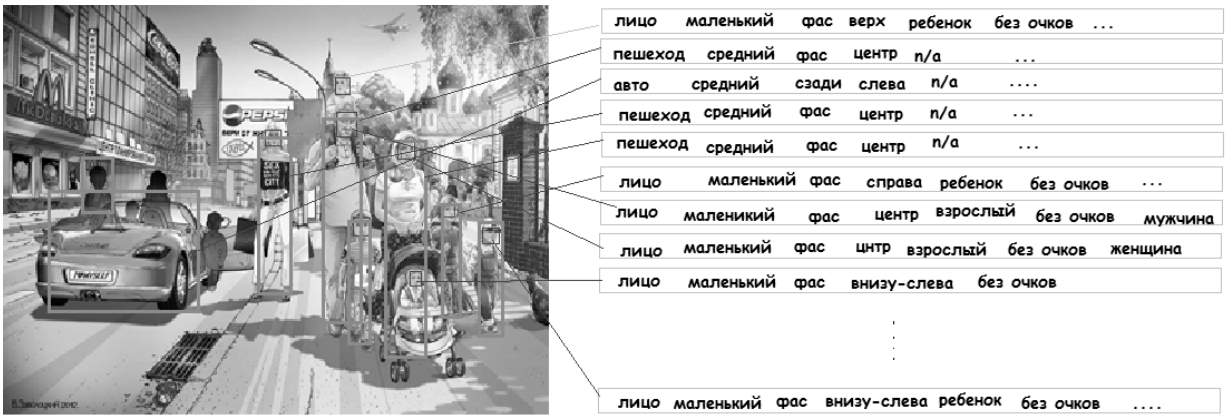


Рис. 1. Формирование семантической сигнатуры изображения с использованием банка детекторов объектов и детекторов атрибутов

Таблица 1

ID	Тип объекта	Размер	Ракурс	Местоположение	Свойство 1	…	Свойство N
	Идентификатор объекта. Соответствует типу детектора (лицо, пешеход, автомобиль)	Признак размера объекта	Признак ракурса	В центре, с краю, слева, справа, вверху, внизу, в углу и так далее	Атрибут объекта. Принимает значения (–2, –1,0,1)	.	Атрибут объекта. Принимает значения (–2, –1,0,1)

Вычисление расстояния между изображениями. Как было показано выше, для описания изображения используются так называемые «семантические сигнатуры», которые можно представить в виде таблицы. Семантическое описание изображения представляет собой множество $V = \{\vec{v}_1 .. \vec{v}_n\}$, каждый элемент которого $\vec{v}_i = \{x_1{}^i .. x_k{}^i\}, i = \overline{1,n}$ описывает свойства некоторого фрагмента изображения. Элементами этих векторов является описание свойств области, полученных с использованием доступных системе детекторов объектов и детекторов атрибутов. Для того чтобы построить систему поиска, нужно ввести понятие расстояния между семантическими описаниями изображений, вариант которого представлен на рис. 1. Для решения этой задачи, мы введем следующие определения:

Перекодировка. Перекодировка служит для представления каждого элемента вектора $\vec{v} = \{x_1 .. x_k\}$, в виде числа.

Расстояние между векторами $\vec{v} = \{x_1 .. x_k\}$, которые описывают некоторый фрагмент изображения.

Расстояние между множествами $V = \{\vec{v}_1 .. \vec{v}_n\}$, которые описывают изображение целиком и являются его семантическим описанием.

Перекодировка и сравнение кодов. Перекодировка служит для представления каждого элемента вектора $\vec{v} = \{x_1 .. x_k\}$ в виде некоторого кодового числа, соответствующего тому или иному свойству найденного объекта. Рассмотрим элементы вектора более детально. Они, в общем случае, соответствуют столбцам табл. 1. В частности:

- Тип объекта
- Размер объекта
- Местоположение объекта
- Ракурс объекта
- Атрибуты объекта.

Перекодировка типа объекта представлена в таблице 2.

Таблица 2

Название детектора	Название объектов	Код
Детектор лица	Лица людей	1
Детектор пешехода	Люди в полный рост	2
Детектор автомобиля	Автомобили	3

Перекодировка размера объекта представлена в таблице 3.

Таблица 3

Размер объекта	Критерий по площади	Код
Очень большой	>50%	1
Большой	>20% <50%	2
Средний	>5% <20%	3
Маленький	<5%	4

Перекодировка местоположения объекта представлена в таблице 4.

Таблица 4

Местоположение объекта	Код
В центре	1
Слева	2
Справа	3
Вверху	4
Внизу	5
Вверху-слева	6
Вверху-справа	7
Внизу-справа	8
Внизу-слева	9

Перекодировка ракурса представлена в табл. 5.

Таблица 5

Ракурс	Код
Прямой (фас)	1
Прямой-слева	2
Прямой-справа	3
Слева	4
Справа	5
Сзади	6
Слева-сзади	7
Справа-сзади	8

Перекодировка любого атрибута представлена в таблице 6.

Таблица 6

Наличие атрибута.	Код
Атрибут невозможно вычислить	–2
Атрибут отсутствует	–1
Атрибут присутствует	1
Атрибут не определен	0

Для сравнения соответствующих кодов x_i описания фрагмента изображения используем бинарную функцию (1).

$$h_i^{km} = \begin{cases} 1, x_i^k \neq x_i^m \\ 0, x_i^k = x_i^m \end{cases}, \quad (1)$$

где *k, m* соответствуют семантическим описаниям изображения *K* и изображения *M*. Заметим, что в случае, если соответствующий атрибут невозможно вычислить, то функция возвращает 1.

Расстояние между фрагментами изображений. Как мы уже знаем, фрагмент изображения описывается вектором $\vec{v} = \{x_1 .. x_k\}$, каждый элемент которого представляет собой кодовое описание некоторого свойства этого фрагмента (таблицы 2–6). Умея сравнивать элементы этого вектора (1), мы можем ввести функцию расстояния между векторами k, m, описывающими прямоугольный фрагмент изображения (2)

$$\rho^{k,m} = \sum_{i=1}^{N} h_i^{km}, \quad (2)$$

С использованием (2) расстояние между идентичными фрагментами, в смысле их семантического описания, будет равно нулю, а максимальное расстояние между фрагментами будет равно *N* – числу элементов вектора, который описывает любой фрагмент изображения.

Мера близости между семантическими описаниями изображений. Для того, чтобы установить степень «похожести» изображений в смысле их семантических описаний, необходимо установить меру близости между ними, которая, как и в случае описания фрагментов изображения для идентичных описаний, давала бы 0, а для всех прочих некоторое число > 0.

Мера Хаусдорфа. Расстояние Хаусдорфа (HD) [4] – это метрика между двумя множествами. В качестве примера рассмотрим два множества точек на плоскости $A = \{a_1 \dots a_m\}$ и $B = \{b_1 \dots b_n\}$. В этом случае расстояние Хаусдорфа между этими двумя множествами точек определяется так:

$$H(A,B) = \max\big(h(A,B), h(B,A)\big), \quad (3)$$

$$h(A,B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|. \quad (4)$$

Здесь $h(A,B)$ называется «прямым расстоянием Хаусдорфа» от множества A до множества B.

Модифицированная мера Хаусдорфа. Для многих приложений, в том числе и для наших задач поиска меры близости между семантическими описаниями изображений, можно применять так называемую «модифицированную меру Хаусдорфа» (5), ее отличие от (3) заключается в том, что вместо максимального расстояния она использует среднее расстояние от множества A до множества B

$$h_{mod}(A,B) = \frac{1}{|A|} \sum_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\|, \quad (5)$$

Подставив в (5) выражение (2) с учетом (1), мы получим соотношение, которое будем использовать в выражении для меры близости между семантическими описаниями изображения (3), которое можно использовать для оценки степени похожести двух изображений:

$$h_{mod}(A,B) = \frac{1}{|A|} \sum_{a \in A} \min_{b \in B} \sum_{i=1}^{N} h_i^{ab}, \quad (6)$$

где h_i^{ab} – *i*-й код, соответствующий векторам *a* и *b*, описывающим фрагменты на двух различных изображениях.

Работа поддержана Грантом Министерства образования и науки Российской Федерации "Эффекты межклеточной сигнализации и пластичности в нейрональных сетях мозга" № 2012-1.1-12-000-1001-069, Соглашение от «20» июля 2012г. № 8055.

Литература

1. *Paul A. Viola, Michael J. Jones.* Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features // CVPR (1) 2001: p. 511–518.

2. *Беллюстин Н.С., Калафати Ю.Д., Ковальчук А.В., Тельных А.А., Шемагина О.В., Яхно В.Г.* Нейроподобный детектор лица. Технические особенности реализации и обучения// X Всероссийская научно-техническая конференция "Нейроинформатика-2008" : Сборник научных трудов, часть 2. / МИФИ, М., 2008. С. 123–132.

3. *Bellustin N., Kovalchuck A., Telnykh A., Shemagina O., Yakhno V., Kalafati Y., Abhishek Vaish, Pinki Sharma, Shirshu Verma.* Instant Human Face Attributes Recognition System // IJACSA. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Special Issue on Artificial Intelligence, September 2011, p. 112–120.

4. *Oliver Jesorsky, Klaus J. Kirchberg, and Robert W. Frischholz.* Robust Face Detection using the Hausdorff Distance // Third International Conference on Audio- and Video-based Biometric Person Authentication, Springer, Lecture Notes in Computer Science, LNCS-2091, p. 90–95, Halmstad, Sweden, 6–8 June 2001.

Сократительная система плазмодия *Physarum polycephalum* как аналог нервной системы на клеточном уровне

В.А. Теплов

Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино
teplov@iteb.ru

В начале XXI века в СМИ поднялся бум о существовании «интеллекта у плесени». Ссылаясь на работы учёных, журналисты писали, что простейшее одноклеточное способно изобретать нетривиальные способы преодоления лабиринтов и разгадывать геометрические головоломки [1]. Они обнаружили у слизистого гриба способность к познанию и предвидению [2], создали на его основе процессор и даже сделали простейшего киборга – робота, часть функций которого выполнял одноклеточный слизевик [3]. За эти исследования группа японских ученых получила две Шнобелевские премии в области когнитивных наук.

Разумное клеточное поведение, обсуждаемое в этих работах, прямо связано с нелинейной динамикой плазмодия *Physarum polycephalum*, т.е. многоголового ☺. Этот свободноживущий одноклеточный организм является классическим объектом при изучении амебоидной подвижности, представляющей собой перемещения клеток по твердому субстрату с помощью временно образующихся на их поверхности выростов, называемых псевдоподиями (ложноножками). Эта локомоция свойственна также тканевым клеткам животных и играет важную роль в процессах заживления ран, иммунитета, канцерогенеза и морфогенеза.

Плазмодий растет на поверхности влажного питательного субстрата в виде протоплазматической пленки, которая в зависимости от запаса пищи может достигать гигантских размеров, отмеченных даже в книге рекордов Гиннеса: площади – квадратного метра и более и толщины – двух миллиметров. Это связано с тем, что деление ядер не сопровождается цитокинезом и поэтому плазмодий остается одной многоядерной клеткой, окруженной единой невозбудимой мембраной. Следует отметить поразительную синхронность деления всех ядер, происходящее каждые 8–12 часов с разбросом всего в нескольких минут, во время которых миграция плазмодия приостанавливается.

Протоплазма плазмодия морфологически дифференцируется на внешнюю, относительно стационарную гелеобразную эктоплазму и внутреннюю, жидкую эндоплазму, текущую к псевдоподиям. В амебоидной локомоции можно выделить следующую хронологическую картину двигательного поведения клетки: стадию вытягивания псевдоподии, стадию ее прикрепления к субстрату и стадию подтягивания остальной части клетки. Поэтому перемещение клетки на большие расстояния требует функционирования её сократительного аппарата в колебательном режиме.

Несмотря на отсутствие специализированных органелл восприятия и движения, плазмодий не хуже высших организмов чувствует внешнее окружение и на основе полученной информации демонстрирует высоко кооперативное поведение, позволяющее ему как целостной системе перемещаться, например, по направлению к источнику пищи, или, наоборот, уходить от токсических веществ или яркого света.

Сократительный аппарат плазмодия представляет собой прикрепленную к мембране трехмерную микрофиламентную сеть, которая формируется из *F*-актина с помощью актин-связывающих белков и в которой функционируют небольшие биполярные олигомеры моторного белка миозина. За счет постоянно идущих процессов полимеризации и деполимеризации актиновых филаментов между эктоплазмой и эндоплазмой поддерживается динамическое равновесие. В эндоплазме при нормальных условиях полимеризации *G*-актина не происходит.

Динамика плазмодия проявляется в хорошо координируемых ритмических сокращениях эктоплазмы, происходящих в зависимости от состояния плазмодия с периодом 1–4 мин. Они вызывают интенсивные возвратно-поступательные потоки эндоплазмы, обеспечивающие не только внутриклеточное перемешивание, но также распластывание и миграцию плазмодия. Миграция начинается при истощении в среде питательных веществ и/или появлении градиентов хемотактически активных стимулов и происходит вследствие того, что объем эндоплазмы, текущей в одном направлении, становится больше, чем в противоположном. При этом создается и поддерживается характерная полярная структура организма в виде веерообразной пленки протоплазмы на фронте и следующей за ней древовидной сети протоплазматических трубок, называемых тяжами (рис. 1).

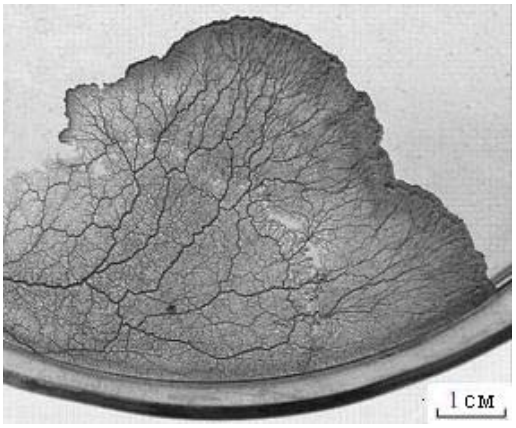


Рис. 1. Характерная форма плазмодия миксомицета *Physarum polycephalum*, мигрирующего в чашке Петри

Формируемая в ходе миграции сеть тяжей позволяет плазмодию в поисках пищи охватывать большую территорию при постоянной массе тела. Скорость перемещения фронта зависит от размеров клетки и для больших плазмодиев может достигать 10 см/ч. Если какая-то часть плазмодия обнаруживает питательные вещества, то остальная по взаимосвязанным тяжам быстро перетекает в это место. Вырезанные из плазмодия фрагменты тяжей в местах повреждений быстро (за 10–20 с) восстанавливают целостность наружной мембраны и ведут себя как самостоятельные организмы. Отдельные участки начинают ритмически сокращаться, сначала нерегулярно, но через 20 мин происходит синхронизация и увеличение амплитуды радиальных колебаний. С течением времени концы тяжа обычно развиваются в новые фронтальные области и между ними возникает челночное движение эндоплазмы. Так возникает квазистоячая волна первого тона. Позже один из конкурирующих фронтов становится ведущим, второй вырождается и возникает характерная полярная форма мигрирующего плазмодия.

Пульсации плазмодия имеют сложную пространственно-временную организацию. В плазмодиях небольших размеров наблюдаются почти синфазные радиальные пульсации сети тяжей, причем фаза сокращения тяжей совпадает с фазой вытягивания псевдоподий фронтальной области. В длинных тяжах возможны стоячие волны более высоких тонов, на что указывает существование областей, по обе стороны от которых эндоплазма течет в противоположных направлениях. Иногда на таких тяжах наблюдается распространение перистальтических сокращений.

Наряду с колебаниями механических параметров в плазмодии существуют синхронные колебания мембранного потенциала, внутриклеточной концентрации ионов кальция Ca^{2+} и ряда других компонентов. Однако до сих пор точно не установлена группа существенных переменных, определяющих автоколебания в целом, т. е. не выяснен механизм простейшего задающего генератора. Обычно считается, что наблюдаемые колебания сократительной активности с минутным периодом возникают из-за неустойчивостей в цепях биохимических реакций, что приводит к периодическим изменениям внутриклеточной концентрации Ca^{2+}, играющих определяющую роль в регуляции сократительных систем актомиозинового типа.

Сейчас имеется множество математических моделей подобных автоколебаний, которые построены в предположении об автокатализе химической переменной и описываются реакционно-диффузионными уравнениями. Японские ученые тоже придерживаются такой точки зрения и считают, что наблюдаемое ими когнитивное поведение клетки основано на самоорганизации пространственно распределенных химических осцилляторов и тесно связано со способностью плазмодия формировать и модифицировать сеть тяжей.

Они пытаются решить две проблемы: как сеть тяжей обрабатывает информацию, проявляя признаки интеллекта, и как форма этой «умной» сети определяется динамикой протоплазмы. Экспериментально было показано, что после прохождения большим голодным плазмодием агаровой подложки с разложенными на нем кучками овсяных хлопьев (любимой пищи плазмодия), на участке оставались только тяжи, соединяющие самым коротким путем хлопья с находящимися на них пленками протоплазмы. Возможно для придания результатам сенсационности, являющейся, по-видимому, двигателем современной науки, между хлопьями помещался лабиринт или хлопья раскладывались так, чтобы соответствовать расположению крупных городов на картах Японии и США [1]. Через сутки плазмодий находил наиболее короткий путь через лабиринт и оптимальные транспортные маршруты между «вкусными городами», которые неплохо совпадали с картой реально имеющихся шоссейных дорог.

Авторы заметили, что тяжи утолщаются, если эндоплазма в них течет долго. При построении модели, описывающей поведения тяжей в лабиринте, были использованы два эмпирических правила морфогенеза тяжей в сети: при разрыве тяжа его фрагменты с одним свободным концом укорачиваются и исчезают, и второе, если две кучки овса соединены несколькими тяжами, то все более длинные тоже стремятся исчезнуть. Далее, предполагая постоянное втекание эндоплазмы в тяж сети на входе лабиринта, авторы по правилам Кирхгофа получили уравнения для пуазейлевских потоков в разветвленных тяжах сети, находящейся в лабиринте. Даже без учета возможного накопления эндоплазмы в узлах эта модель симулирует поведение тяжей в лабиринте, но не дает ответа на причины возникновения градиента давления в реальных тяжах.

Во всех моделях, описывающих автоколебания в чисто химических системах, не понятно, что приводит к возникновению разности фаз между распределенными осцилляторами, которая необходима для возникновения градиентов внутриклеточного давления и установления потока эндоплазмы, являющегося существенным компонентом локомоции амебоидных клеток. Согласно нашей модели эти эксперименты объясняются регулируемой адгезией тяжей к субстрату, возбуждением в них стоячих автоволн радиальных сокращений с пучностями в местах нахождения хлопьев и установившимися в подложке градиентами концентраций питательных веществ. Наверное, если количества овса будет меньше и в разных точках оно будет различным, то конкуренция между фронтами возникнет быстрее и все плазмодиальные тяжи, установив полярную форму, быстрее переместятся в сторону недоеденных хлопьев.

В другой работе японских ученых исследовались поведенческие реакции плазмодия на периодические изменения в окружающих условиях [2]. Полученные данные привели авторов к заключению, что клетка имеет память, способна к обучению и воспоминаниям, а также может предвидеть периодические события. Однако, несмотря на

поднятый ажиотаж, эти результаты до сих пор не воспроизведены в других лабораториях. Эксперименты проводились на маленьких плазмодиях, полученных из вырезанных кончиков фронтальной пленки массой 10 мг (наверное, «голов» ☺) большого плазмодия, которые помещались на узкие треки (0,5× 28 см) при оптимальных для их функционирования температуре воздуха 26 ºС и влажности 90%. Через несколько часов миграции клеток по треку производилось резкое снижения температуры воздуха до 23 ºС и влажности до 60%, что в течение 10 мин практически полностью останавливало миграцию. Было показано, что если три раза подряд с интервалом 50–60 мин на 10 мин снижать температуру и влажность, то ещё через такой же интервал клетки опять на 10 мин останавливаются, как бы ожидая худшего ☺, хотя в это время температура и влажность не изменялась. Со временем клетки забывали процесс обучения, и ещё через час уже не останавливались, а лишь немного замедляли движение. Но стоило опять понизить температуру и влажность, как «память» возвращалась и часом позже они снова останавливались при оптимальных условиях.

Далее авторы предложили простую модель, которая, по их мнению, неплохо объясняет происходящее. Согласно этой модели в плазмодии существует множество разнообразных биохимических осцилляторов с разными периодами. Среди них есть и с периодами производимых серий снижения температуры и влажности, причём их много, и какие-то из них ускоряют движение клеток, какие-то замедляют. Но поскольку все они колеблются с разными фазами, то клетка ползёт с более или менее постоянной скоростью. А вот когда внешние условия ухудшаются, то процессы, которые ускоряли движение в неблагоприятное время, отключаются, так как, по мнению авторов, на них в этих условиях тратится слишком много ресурсов. Поэтому в результате серии стрессовых воздействий в клетке активными остаются лишь осцилляторы, которые в это время замедляют миграцию. Это состояние сохраняется в течение некоторого времени, поэтому клетка продолжают периодически замедлять движение. Затем отключенные осцилляторы непонятным образом восстанавливаются, и клетка забывает заданный ритм.

Описанная умозрительная модель очень спекулятивна. Все клеточные химические осцилляторы, контролирующие активность сократительной системы, надо полагать, имеют общие компоненты, и поэтому эти автоколебания станут синхронными. Надо отметить, что в плазмодии кроме минутных автоколебаний есть еще приблизительно 30-минутный ритм, связанный с модуляцией амплитуды сократительной активности. Эта часто регистрируемая низкочастотная модуляция проявляется в кратковременных остановках плазмодия, которые особенно наглядны при просмотре фильмов, полученных при его цейтраферной съемке. Эти процессы важно учитывать при исследовании реакции плазмодия на периодические стимулы. В рамках нашей модели эта модуляция объясняется тем, что вязкость эктоплазмы на пять порядков превосходит вязкость эндоплазмы и благодаря этому частоты первых пространственных гармоник механохимических автоволн мало отличаются друг от друга [4]. Поэтому в отличие от радиотехнических систем взаимодействие мод плазмодия приводит к биению и модуляции сократительной активности. Это объясняет также слабую зависимость частоты механохимических автоколебаний от размеров плазмодия.

В моделях японских ученых не учитывается структурированность клетки, ее механическая организация, хотя известно, что многие ферменты связаны с цитоскелетом и деформация может изменять их ферментативную активность. Сейчас хорошо установлено существование механической активации плазмодия [5]. Так, резкое растяжение плазмодиальных тяжей в изометрическом режиме на 10–20% вызывает не только увеличение уровня натяжения, но и амплитуды его колебаний. Затем обычно происходит медленная релаксация напряжения с одновременным уменьшением амплитуды колебаний. Повышение нагрузки в изотонических условиях также увеличивает амплитуду колебаний длины тяжа. Сильные продольные растяжения тяжей приводят также к увеличению числа актомиозиновых фибрилл в эктоплазме и даже их появлению в области эндоплазмы. Однако если активированный растяжением тяж перевести в изотонические условия без нагрузки, то фибриллы исчезают в течение нескольких секунд.

Эти данные, свидетельствующие о важной роли механических напряжений в регуляции динамики клетки, и легли в основу нашей математической модели автоволновой подвижности плазмодия [4–7]. Модель основана на гипотезе о существовании обратной связи, возникающей из-за влияния растяжения эктоплазмы на скорость освобождения из везикул ионов Ca^{2+}, которые в свою очередь регулируют активное сокращение и деформацию эктоплазмы. В этом случае сократительный аппарат клетки играет не только роль исполнительного механизма, но и становится частью клеточной системы управления – своеобразным аналогом нервной системы. Это может обеспечить как колебательную неустойчивость, так и быструю по сравнению с диффузией химических регуляторов пространственную координацию локальных сокращений эктоплазмы, что позволяет клетке как целостной системе перемещаться по градиентам хемотактически активных стимулов.

Модель представляет собой нелинейную систему трёх дифференциальных уравнений первого порядка в частных производных, переменными которой являются активное напряжения эктоплазмы, ее деформация и внутриклеточная концентрация Ca^{2+}. Граничные условия – это непротекание эндоплазмы через клеточную поверхность. Когда внутриклеточное давление превышает некоторый порог, нелинейные взаимодействия между переменными вызывают потерю устойчивости стационарного состояния и самовозбуждение механохимических автоколебаний. Автокаталитический

выход Ca^{2+} из внутриклеточных везикул, его диффузия и перенос с потоком эндоплазмы в модели были опущены, что позволило показать возможность пространственной координации механохимических процессов только за счет гидродинамических взаимодействий. Для упрощения мы также не учитывали другие биохимические компоненты регуляторных цепей [8], в которых возможен их автокатализ, обеспечивающий возбуждение химических автоколебаний. Учет этих процессов привел бы к более богатой динамике модели, в которой химические осцилляторы, связанные с механохимическими, способны реагировать на механические напряжения и деформации. А это приводит к их быстрой пространственной координации.

Численные решения модели при экспериментально найденных значениях вязкоупругих параметров хорошо описывают автоволновые сокращения эктоплазмы и возвратно-поступательное течение эндоплазмы. Основная частота автоколебаний, полученная при численных решениях системы, близка к вычисленной частоте первой гармоники и соответствует реальной. Решения системы слабо зависят от начальных условий, при этом неважно, какая из искомых функций получала начальные возбуждения, а какая имела распределение в виде стационарного однородного решения. Для поведения такой системы характерна амплитудная модуляция, происходящая в любой точке пространства. Чем больше гармоник возбуждается, тем сильнее становятся эти эффекты. В двумерной модели, описывающей волны в пленке протоплазмы, когда частоты гармоник значительно различаются, возникают сложные автоволновые картины, проявляющиеся, в частности, в виде вращающихся волн, наблюдаемых и в реальном плазмодии. Результаты численного решения одномерной модели количественно хорошо описывают радиальную и продольную динамику изолированного фрагмента тяжа и, в частности, его активизацию растяжением в изотоническом и изометрическом режимах сокращения.

Для амебоидной локомоции существенное значение имеют адгезивные белки, посредством которых сила, производимая в эктоплазме, прикладывается к поверхности твердого субстрата. Регулируемая адгезия и является фактором, определяющим направление перемещения клеток. Недавно обнаружено, что многие типы тканевых клеток чувствуют и определяют градиент жесткости субстрата и соответственно изменяют скорость и направление движения. В нашей модели заложены механизмы чувствительности плазмодия к жесткости субстрата, поскольку он различает режимы (изометрический или изотонический) сокращения эктоплазмы [7] и таким образом может модулировать механическую сигнализацию, влияя на форму клетки.

Важную роль в организации структуры и миграции плазмодия также играют градиенты хемотактически активных стимулов, которые вероятно и регулируют адгезивные белки. Одним из таких стимулов является эндогенный экстраклеточный регулятор, изменяющий частоту автоколебаний плазмодия и участвующий в организации его полярной формы [9]. Его выделение во внешнюю среду, возможно, тоже зависит от механических напряжений в эктоплазме.

В целом результаты экспериментов подтверждают нашу гипотезу о регуляторной роли сократительного аппарата в координации внутриклеточных процессов и позволяют рассматривать локомоцию амебоидных клеток как автоволновой процесс с рецепторным управлением. Механохимическая неустойчивость и высоко кооперативное поведение амебоидной клетки может служить основой для морфогенетических процессов в многоклеточных организмах. Это позволяет механической системе осуществлять морфогенетические функции, которые обычно приписываются химической неустойчивости. Такой подход может дать подлинно физическое объяснение морфогенетическому полю Гурвича и позиционной информации Вольперта.

Что касается клеточной памяти, если она существует, то ни одна из рассмотренных моделей не объясняет ее механизм. Ее формализованному описанию могло бы способствовать обнаружение в клетках механохимического аналога мемристора – сопротивления с памятью – четвёртого пассивного нелинейного элемента радиотехники [10].

Литература

1. *Nakagaki T., Yamada H., Tóth Á.* Maze-solving by an amoeboid organism // Nature. 2000. V. 407. P. 470.

2. *Saigusa T., Tero A., Nakagaki T. Kuramoto Y.* Amoebae Anticipate Periodic Events // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 018101-1–4.

3. *Adamatzky A.* Physarum machines: Computers from slime mould. World Scientific Series on Nonlinear Science Series A: V. 74. 2010. 280 p.

4. *Teplov V.A., Romanovsky Yu.M., Latushkin O.A.* A continuum model of contraction waves and protoplasm streaming in strands of *Physarum* plasmodium // Biosystems. 1991. V. 24. P. 269–289.

5. *Теплов В.А., Бейлина С.И., Романовский Ю.М.* Автоволновая динамика цитоскелета плазмодия миксомицета *Physarum polycephalum* // Физиология растений. 1998. Т. 45, вып. 2. С. 168–184.

6. *Теплов В.А, Митрофанов В.В., Романовский Ю.М.* Синхронизация механохимических автоколебаний в плазмодии *Physarum polycephalum* периодическими внешними воздействиями // Биофизика. 2005. Т. 50, вып. 4. С. 704–712.

7. *Теплов В.А.* Цитомеханика осцилляторных сокращений. Моделирование продольной динамики протоплазматических тяжей *Physarum polycephalum* // Биофизика. 2010. Т. 55, вып. 6. С. 1083–1093.

8. *Матвеева Н.Б., Теплов В.А., Бейлина С.И.* Сопряжение сигнальных путей PLC и PI3K/PTEN в *Physarum polycephalum*: действие U73122 на двигательную и автоколебательную активность плазмодия // Биол. мембраны. 2012. Т. 29, вып. 3. С. 183–194.

9. *Матвеева Н.Б., Теплов В.А., Незвецкий А.Р., Орлова Т.Г., Бейлина С.И.* Участие цАМФ в регуляции двигательного поведения плазмодия *Physarum polycephalum* // Биофизика. 2012. Т. 57, вып. 5. С. 832–839.

10. *Strukov D.B., Snider1 G.S., Stewart1 D.R., Williams R.S.* The missing memristor found // Nature. 2008. V. 453. P. 80–83.

Физико-математические интерпретации системы зрительного восприятия на уровне врождённых механизмов

В.А. Утробин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
utrobn-va@yndex.ru

Основной объем информации об окружающей среде человек получает с помощью системы зрительного восприятия. Результатом является отображение внешнего физического мира с его законами на «внутренний мир» системы восприятия, без которой человек как наблюдатель не сможем понимать видимое. Результатом отображения является изображение, как любой сигнал на выходе приёмника – сетчатке глазного яблока, конечный во времени наблюдения.

Изложению физико-математических модельных представлений процессов, реализуемых на уровне врожденных механизмов системы зрительной восприятия, посвящён доклад.

Именно врожденность механизмов зрительного восприятия (вне обучения) обуславливает общность законов преобразований в зрительной системе – продукте природы. Поэтому за основу приняты следующие положения:

1. Система зрительного восприятия, понимаемая в целом, необходимо должна быть адекватной внешней среде, т. е. удовлетворять физике пространства и времени с их законами сохранения (симметрии).

2. Зрительное восприятие, понимаемое в целом, должно быть достаточным для того, чтобы «правильно судить об увиденном» и выжить во внешней среде. Это означает, что система зрительного восприятия (в составе с другими системами восприятия) по сложности не должна уступать сложности среды, в которую погружен наблюдатель.

Отсюда следуют «ограничения», накладываемые на систему зрительного восприятия, определяющие ее необходимые и достаточные свойства.

Во-первых, изображение – это множество, каждый элемент которого в фиксированный момент времени t есть неотрицательная действительная функция действительных аргументов вида $M_t = \mu(x, y)$, определенная на конечном множестве точек двумерной области определения (поле зрения), суммируемая, квадратично интегрируемая на этом множестве и наделенная рядом свойств [1]: ограниченностью по области определения и динамическому диапазону, структурированностью, упорядоченностью и дискретностью в пространстве и времени.

Во-вторых, из выделенных свойств следует:

– число возможных изображений конечно в пространстве и времени, а система, раскрывающая неопределенность наблюдаемого изображения, есть автомат без памяти – «простая» комбинационная схема;

– изображение – системное образование, наделенное структурой с бинарными операциями объединения и пересечения, с соответствующей аксиоматикой и отношением порядка;

– изображение – скалярное поле, над которым существует векторное поле со всеми его свойствами в приложении к задаче анализа любого изображения на момент наблюдения.

В-третьих, выделенные свойства изображения как объекта исследования позволяют утверждать следующее (рис. 1): поскольку изображение положительно определено и конечно, то допустимо интегральное отображение ортогонального проектирования (и это верно для любой его подобласти $G_i \subseteq G$):

$$m(G_i) = \iint\limits_{(x,y)\in G_i} \mu(x,y)dxdy. \qquad (1)$$

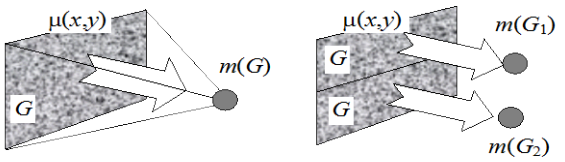


Рис. 1. Реализация Q-преобразования

Данное преобразование в теории активного восприятия названо Q-преобразованием в силу его следующих свойств:

– является информационной моделью первого этапа преобразований в системе зрительного восприятия, нейросети которой допустимо поставить в соответствие элементы типа тонических нейронов;

– с позиций системного анализа позволяет выявить структурный элемент изображения (или его части);

– с позиций физики результатом интегрирования является «гравитационная» масса (в теории активного восприятия изображений [2], с позиций дизайна и теории анализа живописи, названа визуальной массой);

– с позиций математики, в соответствии с теоремой Гаусса о гармонических функциях, «получаем» гармоническую функцию в области определения G и это верно по любой ее подобласти Gi. В результате реализуется отображение изображения в абсолютно гладкое многообразие с потенциальной возможностью последующего выявления внутренней геометрии этого многообразия.

Второй этап – этап формирования системы признаков (рис. 2) – это процесс пространственно-

го дифференцирования, направленный на выявление геометрии анализируемого многообразия через выявление его геодезических,

$$\partial\varphi(x, y)/\partial x^i \equiv \mu_i, \qquad (2)$$

конструктивно выполненный в виде масок-покрытий F_i и реализуемый по ортогональным пространственным направления x_i. В (2) функция $\varphi(x, y)$ – функция на многообразии.

Можно показать, что число направлений i конечно и равно 15. Результатом имеем вектор из 16 ти признаков (включая 0-направление) описания наблюдаемого изображения.

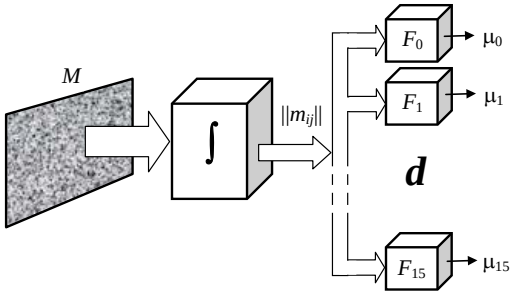


Рис. 2. Система предобработки изображения M

Данное преобразование (осуществляемое после Q-преобразования (1)) определено U-преобразованием в силу следующих его свойств:

– позволяет выявить структурные связи на изображении между парой визуальных масс через реализацию (2) после (1) путём простого вычитания (рис. 3);

– допускает модельное представление на фазические нейроны;

– в декартовой системе координат преобразования (2) входят в ряд Тейлора, являются функциями чувствительности при решении задачи активной идентификации (по этой причине соответствующая теория и названа теорией активного восприятия):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial^{j-1}}{\partial x^{k-1}\partial y^{r}}\right),\ \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial^{j-1}}{\partial x^{k}\partial y^{r-1}}\right),\ \frac{\partial^2}{\partial x\partial y}\left(\frac{\partial^{j-r}}{\partial x^{k-1}\partial y^{r-1}}\right), \qquad (3)$$

где $k, r = \overline{1,3}$, $k + r = 6$, $j = \overline{1,6}$;

– каждая маска-покрытие F_i из 15 позволяет выявить дифференциальную структуру на изображении по одному из направлений;

– каждая производная из (3) в представлении по (2) является производной по направлению векторного поля Киллинга; в силу ортогональности имеем 15 направлений, соответствующих евклидову пространству $\mathbb{E}^5$, т. е. система зрительного восприятия, реализующая преобразования (3), использует «понятия» пятимерного пространства.

Множеству $\{\mu_i\}$ можно поставить в соответствие бинарный оператор $V_i \in \{V_i\} \equiv V$ прямой или инверсный в зависимости от знака элемента разложения $\{\mu_i\}$. Задавая на множестве $\{V_i\}$ операции умножения (пересечения) и сложения (объединения), получаем алгебру описания изображения на двумерных булевых функциях. Такая алгебра есть алгебра синтеза изображений, а синтезированный объект – образ (зрительный образ) наблюдаемого изображения. В этой алгебре можно определить алгебраические группы, эквивалентные сложным и сверхсложным нейронам как сетчатки глаза, так и пирамидным клеткам зрительной коры (рис. 4) [1, 3].

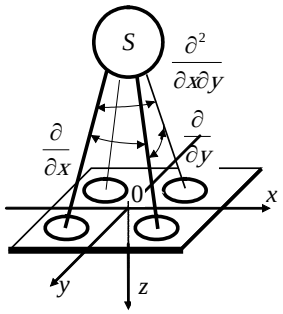


Рис. 3. Система, выявляющая дифференциальные связи

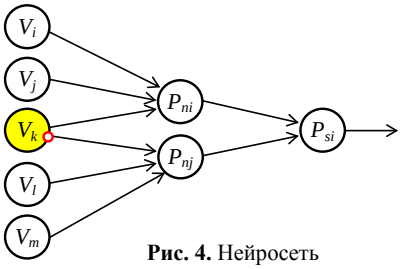


Рис. 4. Нейросеть

Поскольку множество $\{\mu_i\}$ – это линейчатый спектр разложения изображения (или любой его подобласти), то алгебраические группы на трёх элементах $\{P_{ni}\}$ выявляют корреляционные связи в спектральном разложении, а группы $\{P_{si}\}$ позволяют выявлять более сложные информационные связи во входной последовательности.

С позиций лингвистического анализа если множество $\{V_i\}$ – это алфавит, то множеству $\{P_{ni}\}$ соответствуют слова, а множеству $\{P_{si}\}$ – сложносочиненные образования.

Система принятия решений (узнавания) с учетом алгебраических групп – это система классификации в пространстве эталонов (рис. 5) [2].

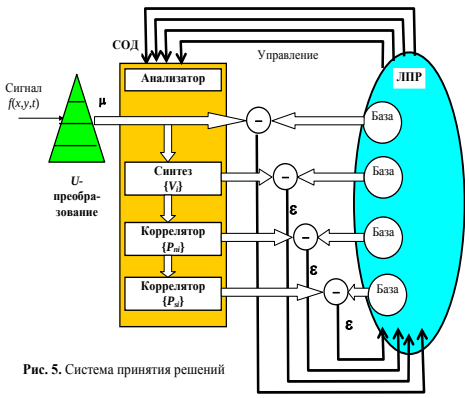


Рис. 5. Система принятия решений

Литература

1. *Утробин В.А.* Информационные модели системы зрительного восприятия для задач компьютерной обработки изображений. Н. Новгород : НГТУ, 2001. 234 с.

2. *Утробин В.А.* Компьютерная обработка изображений: Принятие решений в пространстве эталонов. Н. Новгород : НГТУ, 2004. 216 с.

3. *Утробин В.А.* Физические интерпретации элементов алгебры изображения // УФН. 2004. Т. 174, № 10. С. 1089–1104.

Проблема осознания сенсорных сигналов и музыкальная обратная связь в лечебных процедурах ЭЭГ биоуправления

А.И. Федотчев

Институт биофизики клетки РАН, г. Пущино Московской обл.
fedotchev@mail.ru

Биоуправление с обратной связью (БОС) по электроэнцефалограмме (ЭЭГ) представляет собой комплекс лечебных процедур, при которых текущая амплитуда того или иного ЭЭГ ритма отражается в параметрах звуковых или световых сигналов обратной связи, предъявляемых пациенту с целью осознанной регуляции ЭЭГ в заданном направлении, ориентируясь на воспринимаемые сенсорные воздействия [1]. Наличие сигналов обратной связи от непосредственно регистрируемых ЭЭГ-характеристик индивида обеспечивает методу ЭЭГ-БОС такие важные преимущества по сравнению с другими методами, как адаптивность, предельная индивидуальность и активное участие субъекта в оптимизации своего состояния. Благодаря этим достоинствам данный подход, особенно популярный в развитых западных странах и получивший там название «Neurofeedback» или «Neurotherapy», имеет широкое распространение: к 2007 году в 27 странах мира активно работали 47 клиник, специализирующихся по ЭЭГ-БОС [2].

Несмотря на отмеченные преимущества, в существующих процедурах ЭЭГ-БОС лишь около половины пациентов могут успешно справляться с задачей ЭЭГ-биоуправления, а для остальных, как правило, требуется длительное (порядка 10–20 процедур) обучение [3]. Главная причина этого – наличие определенного порога между сознанием субъекта и центральными механизмами регуляции, который для многих людей затрудняет освоение навыка направленной модификации физиологических состояний [4]. По имеющимся в литературе представлениям данный порог может быть связан с неспособностью пациента к перцептивному контролю физиологических состояний, сниженным уровнем осознанности субъективных реакций или с комбинацией этих индивидуальных свойств больного [5]. Кроме того, серьезным недостатком метода ЭЭГ-БОС, значительно ограничивающим его эффективность, является использование заранее заданных традиционных ЭЭГ-ритмов (тета-, альфа-, бета- и т. п.), которые на самом деле очень гетерогенны и индивидуальны [6] и представляют собой композицию из нескольких узконастроенных и динамичных ЭЭГ-осцилляторов с разными функциональными характеристиками [7].

Преодолеть указанные недостатки существующих методов ЭЭГ-БОС представляется возможным благодаря двум уникальным нововведениям. Во-первых, в процедурах ЭЭГ-БОС необходимо использовать не заранее заданные, излишне широкополосные (4–5 Гц) традиционные ЭЭГ-ритмы, а автоматически выявляемые в реальном времени, характерные и значимые для индивида узкочастотные (0,2–0,4 Гц) ЭЭГ-осцилляторы. Во-вторых, при организации обратной связи представляется перспективным использовать не сенсорные (световые или звуковые) информационные сигналы, которые требуют осознания пациентом для правильного выполнения задачи, а музыкальные воздействия, управляемые текущей амплитудой выявляемых ЭЭГ-осцилляторов по принципу обратной связи и не требующие осознанного восприятия.

Из литературы известно, что положительные результаты при комплексной терапии психогенных функциональных расстройств могут достигаться с помощью аудиовизуальных воздействий [8] или под влиянием их сочетаний с музыкальной стимуляцией [9]. Известно также, что музыка сама по себе может вызывать улучшение психического и физиологического состояния человека благодаря свойству автоматически привлекать к себе внимание и таким образом отвлекать внимание от негативных переживаний, таких как боль, тревожность, беспокойство, печаль и т. д. [10]. Кроме того, через модуляцию активности эмоциональной сферы музыка может играть позитивную роль в лечении аффективных расстройств типа депрессии, тревожности, посттравматического стресса [11]. Если же музыкальные воздействия организуются в строгом соответствии со значимыми биоэлектрическими характеристиками мозга пациента, т. е. музыкой его мозга, то можно предполагать, что они будут обладать повышенной эффективностью.

В литературе имеются лишь единичные сведения об использовании музыки в качестве сигнала обратной связи. Один из вариантов предполагает применение классических музыкальных произведений, но музыка включается, когда текущая амплитуда определенного ЭЭГ-ритма пациента превышает заданный порог, и выключается, когда она не достигает порога. Больному предлагают найти состояние, при котором мелодия звучит непрерывно [12]. Однако конкретных данных о ключевых параметрах музыкальной обратной связи от текущих значений узкочастотных ЭЭГ-осцилляторов пациента и об эффективности таких музыкально-терапевтических воздействий мы не встретили. В частности, в литературе отсутствуют сведения об эффективности использования того или иного ЭЭГ-ритма, в пределах которого у испытуемого выявляются ЭЭГ-осцилляторы. Кроме того, открытым является вопрос о длительности

прерываний музыки в случае несоответствия между пороговым и текущим значениями амплитуды ЭЭГ-осциллятора.

Перечисленные вопросы потребовали проведения экспериментального исследования, цель которого состояла в выявлении оптимальных ключевых параметров музыкальных воздействий, управляемых ЭЭГ-осцилляторами пациента, а также в оценке эффективности коррекции стресс-индуцированных функциональных расстройств с помощью таких воздействий. В предварительных исследованиях была изучена роль двух ключевых факторов – диапазона ЭЭГ (тета-ритм, 4–8 Гц, альфа-ритм, 8–13 Гц, или бета-ритм, 13–25 Гц), в котором у каждого испытуемого определялись доминирующие узкочастотные (0,2–0,4 Гц) ЭЭГ-осцилляторы, и длительность прерывания (3 с или 10 с) звучания музыки при превышении/уходе текущей амплитуды ЭЭГ-осциллятора от исходного порогового уровня. Испытуемым-добровольцам предъявляли классические музыкальные произведения, но звучание музыки прерывалось, если текущие значения тета- или бета-ЭЭГ-осцилляторов превышали исходный уровень, а альфа-осциллятора не достигали заданного исходного порога. Испытуемым предлагали найти состояние, при котором мелодия звучит непрерывно. Было установлено, что оптимальными условиями организации процедур являются минимальная длительность прерывания музыки и использование тета- или альфа-диапазонов ЭЭГ для выявления в них узкочастотных ЭЭГ-осцилляторов пациента.

С учетом этих данных были выполнены исследования, направленные на коррекцию вызванных стрессом функциональных расстройств у сотрудников Пущинского научного центра, обратившихся в кабинет психологической разгрузки по поводу состояний психоэмоционального напряжения и стресса и добровольно согласившихся на участие в 2 обследованиях. В одном из них музыка прерывалась на 3 с при превышении исходной выраженности тета-ЭЭГ-осциллятора, в другом – при снижении исходной выраженности альфа-ЭЭГ-осциллятора. Испытуемым давали задание добиваться непрерывного звучания музыки, используя индивидуальные психофизиологические стратегии регуляции функционального состояния для подавления тета-ЭЭГ-осциллятора или активации альфа-ЭЭГ-осциллятора. В начале и конце каждого обследования пациенты выполняли оценку собственного самочувствия, активности и настроения с помощью теста САН.

Выяснилось, что обследуемые лица достаточно успешно справлялись с поставленной перед ними задачей добиваться непрерывного звучания музыки, произвольно регулируя собственное состояние и уровень биоэлектрической активности мозга. Это проявилось в двух объективных критериях. Во-первых, в обеих процедурах общая длительность звучания музыки превышала 75 % всего времени обследования. Во-вторых, наиболее выраженные изменения мощности ЭЭГ-ритмов происходили в требуемом по условиям процедуры направлении: тета-ритм достоверно подавлялся, а альфа-ритм достоверно возрастал. По данным субъективных отчетов выявлено положительное отношение пациентов к проведенным лечебным сеансам, снижение уровня стресса и позитивные изменения психоэмоционального состояния. Это нашло подтверждение и в результатах выполнения теста САН до и после примененных музыкально-терапевтических воздействий. Под их влиянием выявлены позитивные сдвиги всех показателей, причем в субъективных оценках самочувствия выявлен достоверный рост для процедур, ориентированных на подавление тета-ЭЭГ-осциллятора.

Важно подчеркнуть, что в данном исследовании описанные эффекты достигались уже к концу первой лечебной процедуры, демонстрируя повышенную эффективность примененных нами музыкальных воздействий и их позитивное влияние на функциональное состояние пациентов. Это может объясняться предъявлением музыки в строгом соответствии со значимыми биоэлектрическими характеристиками мозга индивида. Как показано нами ранее [13], в этом случае создаются условия для вовлечения интеграционных, адаптационных и резонансных механизмов деятельности центральной нервной системы в комплексные реакции организма на действие низкоинтенсивных факторов внешней среды.

Таким образом, при музыкальных воздействиях, управляемых по принципу обратной связи ЭЭГ-осцилляторами пациента, наблюдается снижение уровня стресса, нормализация ЭЭГ и позитивные изменения психоэмоционального состояния благодаря взаимодействию между параметрами воздействий и значимыми для индивида характеристиками биоэлектрической активности его мозга. Оптимальными условиями для таких воздействий является использование узкочастотных осцилляторов из тета- и альфа-диапазонов ЭЭГ и минимальная длительность прерывания музыки в случае несоответствия между пороговым и текущим значениями амплитуды ЭЭГ-осциллятора. Полученные данные указывают на возможность успешного использования таких музыкально-терапевтических воздействий в широком спектре процедур медицинской реабилитации.

В настоящее время нами разрабатывается еще один вариант процедур ЭЭГ биоуправления с использованием музыкальной обратной связи от узкочастотных ЭЭГ-осцилляторов пациента. В нем вместо заранее выбранных музыкальных произведений используются различные виды компьютерного преобразования текущих значений биоэлектрических процессов пациента в музыкоподобные звуковые сигналы, организованные по законам музыкальной гармонии с использованием таких специфических компонентов музыки, как высота тона, интенсивность, ритм, тембр и др. Благодаря непрерывному преобразованию биопотенциалов мозга субъекта в динамике и характере таких музыкально-акустических воздействий находит отражение текущее функциональное состояние человека, что дает возможность пациенту

услышать музыкальный образ собственной ЭЭГ [14] и обучиться навыку его модификации для достижения требуемых лечебных эффектов.

При предъявлении пациенту музыки, управляемой его ЭЭГ, достигается оптимальная подстройка параметров музыкального воздействия под индивидуальные свойства нервной системы больного. Через вовлечение сенсорных процессов, процессов внимания, восприятия, памяти, мультисенсорной интеграции и активации эмоциональной сферы такие воздействия будут оказывать позитивное влияние на функциональное состояние и когнитивную деятельность человека, улучшая психическое здоровье и качество жизни индивида. Благодаря этому разрабатываемая технология может найти применение при предотвращении и своевременной коррекции функциональных отклонений, вызванных стрессом, которые приводят к развитию целого ряда стрессогенных заболеваний – болезней сердца, синдрома хронической усталости, гипертонической и язвенной болезни, сексуальных дисфункций и др. Главными мишенями лечебных процедур, предусмотренных в разрабатываемой технологии, являются нервно-психические нарушения, состояния депрессии и патологической тревожности, посттравматический и экзаменационный стресс, панические атаки и другие функциональные расстройства, вызываемые стрессом. Основной контингент пациентов – это больные, проходящие курс послеоперационной реабилитации, специалисты экстремальных профессий, спортсмены, руководители и менеджеры высокого ранга, диспетчеры и операторы на транспорте, в авиации, на атомных и тепловых станциях и т. д.

Работа поддержана Российским гуманитарным научным фондом, грант РГНФ № 12-06-00198.

Литература

1. *Hammond D.C.* What is neurofeedback: an update // Journal of Neurotherapy. 2011. V. 15. P. 305–336.

2. *Maldonado M.C.* Neurofeedback around the world // Journal of Neurotherapy. 2007. V. 10, № 4. P. 63–73.

3. *Weber E., Köberl A., Frank S., Doppelmayr M.* Predicting successful learning of SMR neurofeedback in healthy participants: methodological considerations // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. 2011. V. 36, № 1. P. 37–45.

4. *Fazekas C., Leitner A., Pieringer W.* Health, self-regulation of bodily signals and intelligence: review and hypothesis // Wien Klin. Wochenschr. 2010. V. 122, № 23/24. P. 660–665.

5. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Матрусов С.Г., Семёнов В.С., Соин А.Г.* Использование сигналов обратной связи от эндогенных ритмов пациента для нелекарственной коррекции функциональных расстройств // Успехи физиологических наук. 2006. Т. 37, № 4. С. 82–92.

6. *Hammond D.C.* The need for individualization in neurofeedback: heterogeneity in QEEG patterns associated with diagnoses and symptoms // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. 2010. V. 35, № 1. P. 31–36.

7. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Акоев И.Г.* Ритмическая структура ЭЭГ человека: современное состояние и тенденции исследований // Успехи физиологических наук. 2000. Т. 31, № 3. С. 39–53.

8. *Араби Л.С., Сысоев В.Н., Кремнева Т.В.* Аудиовизуальная стимуляция в комплексной терапии психогенно обусловленных расстройств // Вестник психотерапии. 2011. № 39 (44). С. 9–17.

9. *Пряхина М.В., Голуб Я.В.* Возможности использования палсинга, светозвуковой и музыкальной стимуляции в коррекции состояний нервно-психической дезадаптации сотрудников ОВД // Вестник психотерапии. 2012. № 42 (47). С. 85–94.

10. *Koelsch S.* A neuroscientific perspective on music therapy // Ann. NY Acad. Sci. 2009. V. 1169. P. 374–384.

11. *Carr C., d'Ardenne P., Sloboda A., Scott C., Wang D., Priebe S.* Group music therapy for patients with persistent post-traumatic stress disorder – an exploratory randomized controlled trial with mixed methods evaluation // Psychol. Psychother. 2012. V. 85, № 2. P. 179–202.

12. *Яковлев Н.М., Константинов К.В., Косицкая З.В., Клименко В.М.* Стратегия коррекции девиантного поведения подростков на основе метода адаптивной саморегуляции // Физиология человека. 2007. Т. 33, № 2. С. 42–47.

13. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Семёнов В.С.* Нелекарственная коррекция функциональных расстройств у человека. Принцип двойной обратной связи от ЭЭГ-осцилляторов пациента. Saarbrucken : LAP Lamberts Academic Publishing, 2010. 79 с.

14. *Яковлев Н.М., Косицкая З.В., Клименко В.М., Непрялова Н.Е., Константинов К.В.* Снижение выраженности аффективных расстройств у больных с дебютом шизофрении методом биоакустической коррекции // Журн. неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2011. Т. 111, № 12. С. 32–35.

Сердечно-сосудистая система в условиях раздражения слухового анализатора

М.А. Филатов, Т.В. Гавриленко, Г.Р. Гараева, Д.А. Сидоренко, И.Ф. Файзуллина

Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
karmacurator@mail.ru

В современном мире практически не существует человека, который в той или иной степени не был бы озабочен экологическими проблемами и вопросами собственной экологической безопасности [1, 2]. Наряду с проблемами загрязнения воздуха, почвы и воды человечество столкнулось с проблемой борьбы с шумом. Появились и получают широкое распространение такие понятия, как «акустическая экология», «шумовое загрязнение окружающей среды» и др. Под шумовым загрязнением понимают раздражающие звуки антропогенного происхождения, которые нарушают жизнедеятельность живых организмов и человека [3]. Негативное влияние сильных шумов на организм человека известно, но нет четкого понимания влияния акустических сигналов малой мощности на функциональные системы организма человека.

Целью настоящей работы является изучение особенностей хаотической динамики поведения параметров сердечно-сосудистой системы человека и, как следствие, влияния на вариабельность сердечного ритма под воздействием различных акустических сигналов в комфортных пределах интенсивности.

Для проведения эксперимента была отобрана группа испытуемых (студенты г. Сургута) в количестве 37 человек и возрасте от 20 до 22 лет. Перед экспериментом все испытуемые на момент проведения эксперимента были здоровы (был проведен опрос на наличие тех или иных патологий). Эксперимент проводился в 3 этапа. На первом этапе у испытуемых регистрировались параметры сердечно-сосудистой системы (ССС) в спокойном состоянии (при отсутствии активного акустического воздействия). На втором этапе испытуемому было предложено прослушать запись ритмичной музыки и при этом регистрировались параметры ССС. На третьем этапе к прослушиванию предлагалась классическая музыка. Между каждым этапом испытуемым предоставлялось время на восстановление от 15 мин. Также необходимо отметить, что акустическое воздействие осуществлялось на среднем уровне громкости, при котором испытуемые не испытывали дискомфорта, связанного с высокой интенсивностью звукового потока. Информация о состоянии параметров вариабельности сердечного ритма (ВСР) была получена с использованием пульсоксиметра «ЭЛОКС-01 М». В устройстве «ЭЛОКС-01 М» используется фотооптический датчик, с помощью которого регистрируется пульсовая волна с одного из пальцев испытуемого в положении сидя, в течении 5-мин интервала. Протокол регистрации данных доступен при помощи специализированной программы обработки данных. Затем данные обрабатывались методами теории хаоса-самоорганизации (ТХС), построены квазиаттракторы (КА), рассчитаны их площади V_G с целью определения уровня ВСР. В качестве основного параметра использовались значения межимпульсных интервалов сердечных сокращений. Для сравнительного анализа использовались статистические методы обработки данных, в частности были рассчитаны значения энтропии Шеннона.

Нейровегетативная регуляция частоты сердечных сокращений (ЧСС) у испытуемых с позиций теории хаоса-самоорганизации представляет собой хаотическую динамику поведения эффекторных систем. На рисунке 1 представлена реакция ССС человека при воздействии ритмичной музыки в сравнении со спокойным состоянием. При прослушивании ритмичной музыки наблюдается значительное сокращение площади КА, что свидетельствует о сокращении ВСР, но при этом заметна и существенная разница.

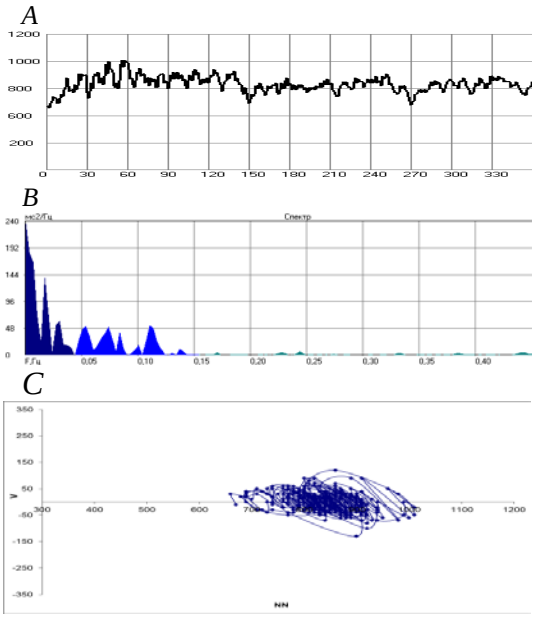


Рис. 1. Кардиоинтервалы в виде графика $x_1 = x_1(t)$, где x – величина межимпульсных интервалов по данным пульсоинтервалографии (*A*), амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) сигнала $x_1(t)$ (*B*) и фазовый портрет сигнала на плоскости с координатами x_1 и $x_2 = dx_1/dt$ (*C*) для испытуемого ЮСУ в спокойном состоянии (без внешних акустических воздействий). $V_1 = 87500$

Подобная реакция у испытуемых предсказуема, и объяснить ее можно тем, что при прослушивании ритмичной музыки ритм, заложенный в музыкальную композицию, навязывается и функцио-

нальным системам организма (ФСО). При проведении эксперимента использовался комфортный для испытуемого уровень звука, и даже в таком варианте мы видим значительное изменение в ФСО.

Если уровень воздействия увеличить, то мы получим значительное упорядочивание в работе ФСО и, в частности, кардиореспираторной системы (КРС). В соответствии с современными представлениями любая строгая упорядоченность в работе ФСО свидетельствует о патологических процессах; поэтому неудивительно, что на музыкальных концертах люди часто испытывают дискомфорт, наиболее часто слушатели концертов обращаются с симптомами повышенного артериального давления, аритмией и т. д. Для сравнения полученных результатов в рамках ТХС был проведен расчет стохастической оценки хаотической динамики – получены значения энтропии Шеннона (таблица) и построены гистограммы распределения частот попадания регистрируемых кардиоинтервалов в один из 30 интервалов разбиения (рис. 2). Из таблицы видно, что при прослушивании ритмичной музыки площадь КА уменьшается, а значение энтропии возрастает по сравнению со значениями, полученными в спокойном состоянии, что свидетельствует о повышении уровня упорядоченности в режиме работы сердечного ритма. Значения энтропии демонстрируют обратную динамику, что противоречит наблюдаемой картине и физиологии.

Любое направленное акустическое воздействие изменяет значения параметров ВСР, об этом свидетельствуют и изменения площади квазиаттракторов, спектрограммы и значения энтропии Шеннона.

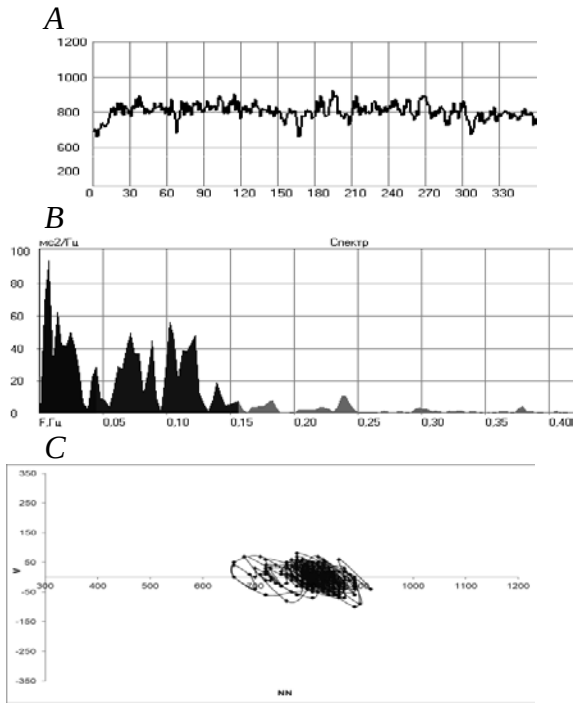


Рис. 2. Кардиоинтервалы в виде графика $x_1 = x_1(t)$, где x – величина межимпульсных интервалов по данным пульсоинтервалографии (A), амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) сигнала $x_1(t)$ (В) и фазовый портрет сигнала на плоскости с координатами x_1 и $x_2 = dx_1/dt$ (С) для испытуемого ЮСУ под воздействием ритмичной музыки. $V_2 = 46800$

Значения энтропии Шеннона и площадей квазиаттракторов под воздействием ритмичной и классической музыки

	В спокойном состоянии	Ритмичная музыка
Площадь КА V_G (у. е.)	87500	46800
Энтропия Шеннона *Ssh*	3,9647	4,1232

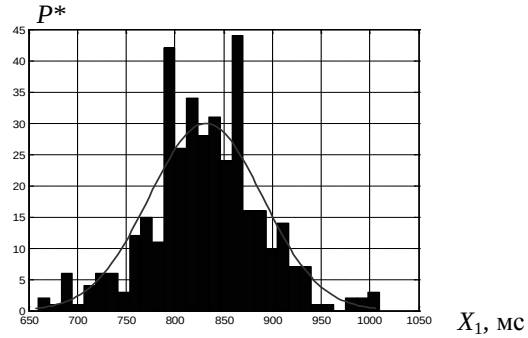


Рис. 3. Распределение значений кардиоинтервалов при расчете энтропии Шеннона испытуемой ЮСУ в спокойном состоянии

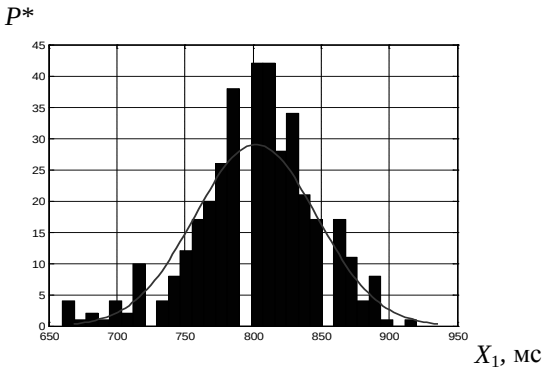


Рис. 4. Распределение значений кардиоинтервалов при расчете энтропии Шеннона испытуемой ЮСУ под воздействием ритмичной музыки

Показано, что при наличии выраженного ритма в акустическом сигнале происходит навязывание его ССС человека, значительно снижается ВСР. Кроме этого показана разнонаправленность результатов, полученных методами классической статистики и ТХС.

Литература

1. *Антонец В.А., Ковалева Э.П.* Статистическое моделирование непроизвольных микроколебаний конечности // Биофизика. 1996. Т. 41. С. 704–710.
2. *Еськов В.М., Буров И.В., Филатова О.Е., Хадарцев А.А.* Основы биоинформационного анализа динамики микрохаотического поведения биосистем // Вестник новых медицинских технологий. 2012. Т. 19, № 1. С. 15–18.
3. *Еськов В.М., Хадарцев А.А., Гудков А.В. и др.* Философско-биофизическая интерпретация жизни в рамках третьей парадигмы // Вестник новых медицинских технологий. 2012. Т. 19, № 1. С. 38–41.

От фундаментальных нейронных представлений пространственного окружения к математическому моделированию и созданию электронного «мозга-трансформера»

В.Д. Цукерман, С.В. Кулаков, В.В. Золотухин

НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана ЮФУ, Ростов-на-Дону
vdts@krinc.ru

В основу развиваемой нами концептуальной модели формирования ментальных представлений пространственного окружения положен ряд фундаментальных результатов экспериментальных исследований гиппокампальной формации мозга и результаты наших исследований математических моделей свободно масштабируемых сетей с четным циклическим торможением. Некоторые наиболее важные из них включают в себя следующие:

1. «Решетчатые карты» формируются в результате исследовательского поведения организма в медиальной энторинальной коре мозга и имеют несколько независимых масштабов с различным пространственным разрешением, носители которых организованы в виде нейронных модулей [1].

2. Решетчатые клетки каждого нейронного модуля посылают сигналы в одни и те же клетки места гиппокампа, которые продуцируют «рецептивные поля места» конвергенцией сигналов от широкого спектра энторинальных функциональных типов клеток [2].

3. В условиях реального поведения решетчатые клетки сообщают гиппокампальным клеткам места о малейших изменениях в окружении. Взаимодействие частотного (тета-) с временным (гамма-) кодированием играет основополагающую роль в пространственной обработке сигналов. Теперь такое частотное мультиплексирование получило прямое экспериментальное подтверждение на животных [3] и в модельных исследованиях [4].

4. Навигация высокоорганизованных организмов основана на двух связанных механизмах представления пространственного окружения : механизма, который вычисляет статическую (геометрическую) информацию о положении навигатора в некоторой референтной системе, и механизма, который вычисляет текущие координаты, основанные на интегрировании сигналов собственного движения и знании предыдущих позиций. Первый часто упоминается как основанная на карте или аллоцентрическая навигация, в которой пространственные отношения среди ориентиров помогают в определении местоположения организма в окружении [5–7]. Второй механизм часто называют интегрированием траектории (пути) или эгоцентрической навигацией. Интегрирование пути требует активного движения тела и вычисляет расстояния и повороты в условиях исследовательского поведения в окружении.

5. Осцилляторные решетки ECI-сетей – основополагающий принцип организации архитектуры нейронных сетей, дающий происхождение частотно-фазовому коду нейронных сообщений, формированию нескольких функционально специализированных типов пространственно активных клеток, в том числе с периодическими решетчатыми полями активности [8–12].

6. Специфическая модульная организация свободно масштабируемых ECI-сетей позволяет осуществлять интегрирование траектории движения вдоль набора направлений с различными масштабами по каждому направлению [12].

Прежде чем перейти к фактическим результатам, приведем следующие важные рассуждения. Все процессы в нейронных структурах мозга так или иначе связаны с явлением интегрирования сигналов, за которым стоит фундаментальный принцип, реализуемый в живых организмах: мозг работает с производными физических величин, подразумевая дифференцирование в сенсорных системах, т. е. реагирует на тончайшие изменения в окружении, и интегрирование в моторных системах, вычисляя дифференциалы, т. е. пространственные приращения (в нашем случае сегменты траектории). Для того чтобы генерировать ответы и произвести дифференциал, стимулы в моторных системах вообще демонстрируют адаптацию или чувствительность к скорости (d/dt).

Афферентные сигналы, достигающие мозга, неизменно подвергаются высокочастотной фильтрации либо путем нейронной обработки, либо посредством механизмов, встроенных в сами сенсорные рецепторы. Адаптация, или чувствительность к скорости, помогает предсказанию, устранению избыточности в нервных кодах и увеличению динамических диапазонов. Очевидный пример этому – глазодвигательная система.

Здесь мы рассматриваем другой пример, связанный с интегрированием траектории пространственного движения в нейронных структурах энторинально-гиппокампальной системы, используя в качестве ее входов сигналы трансляционной и угловой скорости поворотов (head direction signals) виртуального навигатора, а в качестве выходов – сегменты пространственной траектории. Естественно, что основным требованием к реализации этой задачи должно быть ее решение в реальном времени. Более того, поскольку процесс интегрирования траектории протекает, с одной стороны, в структурах мозга, связанных с эпизодической памятью, т. е. носит ментальный (мысленный) характер, а с другой – еще до моторных систем,

обеспечивающих реальную локомоцию, то нейродинамика этого процесса должна быть предвосхищающей, прогнозирующей, а значит, очень быстрой.

Полученные нами ранее результаты математического моделирования биологических алгоритмов, основанных на вышеперечисленных парадигмах, позволяют ставить ряд практических задач, связанных с электронным макетированием, основной целью которого является создание в дальнейшем автономных мобильных устройств с нейромиметическим управлением.

Основная сложность достижения этой цели заключается в том, что численные методы интегрирования систем нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка, описывающих динамику осцилляторных ECI-сетей, требуют больших вычислительных затрат и не позволяют достичь реального времени вычислений.

Применение многопроцессорных систем облегчает эту проблему, но не снимает ее полностью, так как сама идеология подобных сетей подразумевает обмен информации каждого элемента сети с соседними, причем на каждом шаге вычислений. В результате даже после реализации минимального времени вычислений для каждого отдельного нейрона обмен информацией с окружающими элементами сети займет гораздо большее время, потребовав остановки всей сети.

Действительно, все современные универсальные вычислительные средства строятся на основе последовательных процессов, которые для обмена информацией с внешним источником реализуют механизм прерываний – выполнение основной программы прекращается и стартует подпрограмма обработки соответствующего вектора прерывания. Соответственно, каждому нейрону для получения информации от соседних требуется их последовательно останавливать и опрашивать. Для преодоления обозначенных трудностей нами исследовалась архитектура сети, где каждый нейрон реализуется на отдельном процессоре, а обмен информацией между соседними элементами сети осуществляется посредством механизмов прямого доступа к памяти. Такая схема позволяет реализовать параллельные вычисления для всех нейронов сети и сделать обмен информацией между ними одновременным. Иными словами, сеть подобного рода можно наращивать практически бесконечно и это не будет приводить к росту времени счета, поскольку время, необходимое для расчета всей сети, будет всегда равно времени расчета одного ее элемента.

Как было сказано выше, первым шагом к реализации нейронных сетей с четным циклическим торможением, способных кодировать сигналы в режиме реального времени, является разработка одиночного осцилляторного модуля, меняющего свое поведение в зависимости от состояния входов и реализующего специальный механизм обмена информацией с соседними модулями. Объединение подобных устройств в единую систему позволяет создать динамическую нейронную сеть, реализующую режим параллельных вычислений в реальном времени.

Вычислительное ядро аппаратной реализации осцилляторного модуля описывается системой уравнений (1) и соответствует блок-схеме, представленной на рис. 2, и представляет собой пару нейронных элементов со специальными динамическими свойствами и сильным взаимным торможением. Причем выход (y) одного нейрона влияет на вход другого с коэффициентом $k_1 = k_2 = -2{,}27$, что отражено на рис. 2 перекрестными связями. Решается система численно с применением метода Рунге – Кутты, критическим моментом является выбор временного шага расчета. Как показала практика, подходящее значение шага 0,01. Таким образом, сеть предлагаемой архитектуры представляет собой комбинацию вычислительных модулей, каждый из которых реализует численную схему решения системы дифференциальных уравнений.

$$\begin{cases} \tau \dfrac{dx}{dt} = -x - b\tilde{x} + S_0, \\ T \dfrac{d\tilde{x}}{dt} = -\tilde{x} + y, \\ y = \begin{cases} x, x > 0, \\ 0, x \le 0. \end{cases} \end{cases} \qquad (1)$$

Причем каждый модуль синхронизирован с соседними и результат расчета каждого шага каждого модуля определяет входной сигнал для расчета следующего шага соседними модулями. Для реализации режима вычислений в реальном времени каждый модуль сети представляет собой отдельный блок, в котором размещено вычислительное ядро, интерфейсные блоки, осуществляющие обмен с соседними модулями сети, и интерфейсный блок, осуществляющий ввод-вывод входной и выходной информации из сети.

Все осцилляторные модули построены по единой блок-схеме, представленной на рис. 1 и 2.

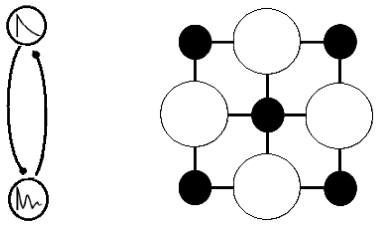


Рис. 1. Базовые конструктивные блоки микросхемной организации ECI-сети. *Слева* – двухнейронный осциллятор с взаимными тормозными связями между медленным и быстрым нейронами. *Справа* – решетка из 9 нейронных осцилляторов представляет базовый конструктивный блок и основную функциональную единицу ECI-сети. Большими кружками обозначены информационные единицы, маленькими черными кружками показаны референтные осцилляторы. Информационные и референтные двухнейронные осцилляторы имеют одинаковые параметры и отличаются лишь тем, что на информационные осцилляторы поступают внешние входные сигналы, а на референтные не поступают. Все связи между осцилляторами – рекуррентные, тормозные

Добавим к вышеизложенным соображениям, что замечательные функциональные возможности ECI-сети, тщательно исследованные нами в компьютерных вычислительных экспериментах, во многом определяются модульностью ее базовых конструктивных блоков (см. рис. 1), что имеет дополнительные преимущества при макетном электронном исполнении данной сети.

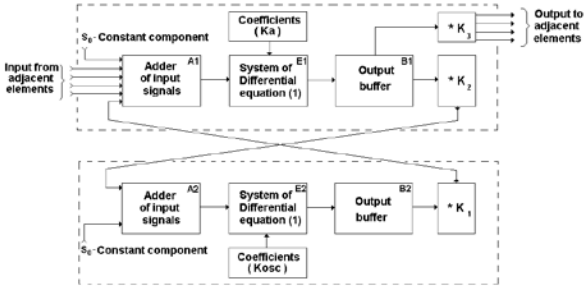


Рис. 2. Функциональная схема базового двухчастотного (тета-гамма) осциллятора. В блоке А1 суммируются значения входных сигналов от соседних осцилляторных модулей, постоянная составляющая входа (S_0) и предыдущее значение выходного сигнала осцилляторного нейрона. В блоке А2 суммируется постоянная составляющая входа (S'_0) и предыдущее значение выходного сигнала аналогового нейрона. В блоках Е1, Е2 решается система (1) с соответствующим набором коэффициентов и значений входных сигналов. Результат сохраняется в буферах В1, В2, умножается на коэффициенты (k_1, k_2, k_3), а далее передается к соседним осцилляторным модулям и по перекрестным связям

На рисунке 3 приведена осциллограмма выходной активности одиночного осцилляторного модуля сети (см. рис. 1, *слева*). Период повторения гамма-пачек активности, в нашей терминологии – «тета-цикл», задает основное требование для проектирования электронного макета нейронной сети. По нашим оценкам, для реализации режима реального времени обработки пространственной информации необходимо обеспечить вычисление не менее 10 тета-циклов в секунду. Такая оценка происходит из требований вычислений, соответствующих отдельному сегменту пространственной траектории, полученной при компьютерном моделировании. Проведенный этап макетирования позволил определить характеристики базового функционального блока из 9 осцилляторных модулей и произвести оценку всех временных характеристик.

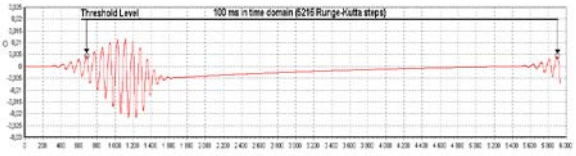


Рис. 3. Осциллограмма выходной активности осцилляторного модуля. Показан отдельный период генерации гамма-пачек с частотой тета-ритма

Вместе с тем в процессе проведенных испытаний макета базового функционального блока стало ясно, что построение крупномасштабной сети потребует больших затрат потребляемой энергии. Решение, которое обещает чрезвычайную эффективность использования энергии при работе близко к шумовому пределу, связано с применением аналоговых вычислений. В этой связи можно подчеркнуть, что мозг использует градуальные дендритные потенциалы (аналоговые вычисления), сигналы типа «все-или-ничего» (цифровую коммуникацию) и вероятностные синапсы. Появившиеся недавно сообщения об использовании при построении электронных крупномасштабных нейронных сетей (Neurogrid, до 1 млн. нейронов), объединяющих в себе аналоговые параллельные вычисления и программируемые цифровые операции, позволяют рассматривать их как наилучшее решение для практических реализаций нейросетевых решений в реальном времени с затратами энергии до 100 000 раз меньше. Такие примеры использования аналоговых вычислений дали чрезвычайную эффективность использования энергии при работе близко к шумовому пределу [13–14].

Исходя из этих соображений, в настоящее время нами разработана схема рассмотренного выше базового функционального блока нейронной сети гибридного (аналого-цифрового) типа. В такой схеме решение системы уравнений методом Рунге – Кутты осуществляется с использованием линейных аналоговых элементов. Результат каждого шага решения фиксируется в аналоговом запоминающем устройстве и используется для вычислений на следующем шаге. Цифровая часть схемы реализуется на микроконтроллере, который обеспечивает тактирование шагов вычислений и передачу результатов во внешнюю линию связи (BlueTooth, компьютер). Время получения результата одиночного ответа сети в такой схеме определяется произведением времени передачи одного бита данных на число ячеек сети.

В заключение отметим, что увеличение числа базовых функциональных модулей в сети позволяет последовательно увеличивать разрешающую способность, т. е. точность пространственных представлений. Минимальный размер сети – базовый функциональный модуль, показанный на рис. 1 *справа*, позволяет получить наиболее грубое представление пространственной траектории. Ясно, что решение навигационных задач и целенаправленное поведение в пространственном окружении с многочисленными источниками ориентиров и препятствий диктуют необходимость применения системы с большим числом функциональных модулей – отсюда соответствующее название статьи.

Литература

1. *Stensola H., Stensola T., Solstad T., Froland K., Moser M.-B., Moser E.I.* The entorhinal grid map is discretized // Nature. 2012. V. 492. P. 72–78.

2. *Zhang S.-J., Ye J., Miao C., Tsao A., Cerniauskas I., Ledergerber D., Moser M.-B., Moser E.-I.* Optogenetic dissection of entorhinal–hippocampal functional connectivity // Science. 2013. V. 340. P. 273–287.

3. *Pastoll H., Solanka L., van Rossum M.C.W., Nolan M.F.* Feedback inhibition enables theta-nested gamma oscillations and grid firing fields // Neuron. 2013. V. 77. P. 141–154.

4. *Lisman J.E., Jensen O.* The Theta-gamma neural code // Neuron. 2013. V. 77. P. 1002–1016.

5. *Jacobs L.F.* From movement to transitivity: The role of hippocampal parallel maps in configural learning // Rev. Neurosci. 2006. V. 17. P. 99–109.

6. *Sargolini F., Fyhn M., Hafting T., McNaughton B.L., Witter M.P.* Conjunctive representation of position, direction, and velocity in entorhinal cortex // Science. 2006. V. 312. P. 758–762.

7. *Burgess N.* Spatial cognition and the brain // Ann. N.Y. Acad. Sci. 2008. V. 1124. P. 77–97.

8. *Цукерман В.Д.* Нелинейная динамика сенсорного восприятия, или Что и как кодирует мозг. Ростов-на-Дону. : РГУ, 2005. 195 с.

9. *Цукерман В.Д.* Математическая модель фазового кодирования событий в мозге // Математическая биология и биоинформатика. Пущино, 2006. Т. 1, № 1. С. 97–107.

10. *Цукерман В.Д., Кулаков С.В., Каримова О.В.* Пульсирующие коды событийных последовательностей // Математическая биология и биоинформатика. Пущино. 2006. Т. 1, № 1. С. 108–122.

11. *Цукерман В.Д., Каримова О.В., Кулаков С.В., Сазыкин А.А.* Современные нейробиологические данные и новое в нейродинамике навигационного поведения // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. М. : Радиотехника, 2010. № 2. С. 17–27.

12. *Цукерман В.Д., Еременко З.С., Каримова О.В., Сазыкин А.А., Кулаков С.В.* Математическая модель пространственного кодирования в гиппокампальной формации. I. Нейродинамика решетчатых клеток // Математическая биология и биоинформатика. Пущино, 2012. Т. 7, № 1. С. 87–124.

13. *Silver R., Boahen K., Grillner S., Kopell N., Olsen K.L.* Neurotech for Neuroscience: unifying concepts, organizing principles, and emerging tools // J. Neurosci. 2007. V. 27. P. 11807–11819.

14. *Choudhary S., Sloan S., Fok S., Neckar A., Trautmann E., Gao P., Stewart T., Eliasmith C., Boahen K.* Silicon neurons that compute // Lect. Notes Comput. Science. 2012. V. 7552. P. 121–128.

Когнитивная фрагментация пространственного поведения нейронными микросхемами мозга

В.Д. Цукерман, З.С. Харыбина, С.В. Кулаков

Научно-исследовательский институт им. А.Б. Когана ЮФУ, Ростов-на-Дону
vdts@krinc.ru

Восприятие окружающего пространства и умение ориентироваться в нем является одной из главных способностей, которой наделен мозг животных и человека. Поведение организмов в пространственном окружении, планирование поведения и выбор конкретных действий происходят в том или ином пространственно-временном контексте. Этот контекст формируется посредством активности нейрональных микросхем в специализированных структурах мозга, деятельность которых направлена на постоянное определение текущего пространственного положения и направления движения организма-навигатора. Выяснение того, как эта информация обрабатывается в мозге млекопитающих, является фундаментальной проблемой, в решении которой благодаря современным методам клеточных регистраций в свободном поведении животных в последние годы хотя и сделан большой шаг вперед, однако, остаются многочисленные вопросы. О важности проблемы поиска микросхемных решений обработки пространственно-временных сигналов в мозге говорит тот факт, что нейронаука схемных решений – функциональная коннектомика – в последнее время стала ведущим направлением науки о мозге. Об этом свидетельствует и объявленный президентом США многолетний проект «The Brain Activity Map Project and the Challenge of Functional Connectomics» («Brain»). Какова архитектура нейронных микросхем, какое место в иерархии мозговой обработки паттернов входных сигналов в условиях навигационного поведения они занимают, как представлены фрагменты поведения в активности нейронных ансамблей при выполнении пространственного движения – вот основные вопросы, которым посвящен данный доклад.

Несколько современных фундаментальных представлений, основанных на последних экспериментальных данных. Пространственные отношения между наземными ориентирами и объектами окружения образуют базовое картоподобное представление окружения организма. Позиция животного внутри этой нейронной карты определяется благодаря взаимодействиям многочисленных специализированных клеток гиппокампально-энторинальной системы мозга [1]. Эта система включает в себя многочисленные нейроны, представляющие местоположение животного в пространственном окружении: так называемые клетки места (place cells), избирательно активные только тогда, когда животное переходит через специфические места в окружении [2, 3]; нейроны, которые обеспечивают организм информацией о его дирекциональной ориентации и, по-видимому, лежащие в основе чувства направления – «клетки направления головы» (head direction cells) [2, 3], а также многократно активные нейроны, названные «решетчатыми клетками» (grid cells) [4, 5]. Решетчатая клетка названа так по ее особенности периодически разряжаться при движении организма, создавая гексагональные (треугольные) сетки в ментальной карте мозга его пространственного окружения.

Согласно последним экспериментальным данным перечисленные типы клеток и их взаимодействия создают не единственное ментальное представление (карту) пространственного окружения с его ориентирами и многочисленными объектами. Сейчас показано, что такие карты организованы в четырех-пяти нейронных модулях с различными пространственными масштабами представления (предполагается, что таких модулей может быть до десяти) [6]. Каждый такой модуль реагирует на изменения в окружении поразному. Эта независимость может использоваться мозгом, чтобы создать новые комбинации, которые являются крайне необходимым инструментом для формирования пространственной памяти. Как известно, отдельные нейроны образуют синаптические контакты с тысячами других нейронов. В распределенных схемах больше матрица связанности, больше и избыточность внутри сети. Особенность модульной организации нейронных карт состоит в том, что они перекрываются или проникают друг в друга [6].

Обладая распределенными связями, нейроны являются субъектом непрерывных, динамических перестроек, участвуя в различных пространственных представлениях, в том числе масштабов. Есть основания полагать, что функция нейронных микросхем является возникающей на каждом новом уровне иерархической организации из-за сложных взаимодействий между ее базовыми элементами. Пример такой организации исследован нами на примере так называемых сетей с четным циклическим торможением (ECI-networks). Детальное описание математической модели этих осцилляторных сетей с рекуррентными тормозными связями можно найти в ранее опубликованных нами работах [7–10].

Динамическое представление самолокализации в пространстве у высших организмов в значительной степени выполняет медиальная энторинальная кора (MEC). Важнейший функциональный аспект нейродинамики ECI-сетей как базовой микросхемы MEC заключается в том, что топологические и метрические пространственные представления обеспечиваются решетчатыми клетка-

ми, покрывающими мозаикой окружение в виде периодического гексагонального паттерна. Кластеры решетчатых клеток перекрывающихся нейронных модулей могут создавать представления различного масштаба и ориентации в контексте неспецифического входа трансляционной скорости движения организма-навигатора [10]. Более того, слабые тормозные взаимодействия информационных осцилляторов сети позволяют этим модулям независимо отвечать на изменения в геометрии и масштабах окружения.

Следствием известного феномена тета-фазовой прецессии является то, что клеточная активность в ранних фазах тета-осцилляций представляет места позади животного, в то время как клетки, активные в более поздних фазах тета-цикла, представляют места впереди животного. Таким образом, короткие траектории протяженностью от нескольких сантиметров до метра могут быть представлены в каждом тета-цикле [11]. Гиппокампальная формация сжимает текущий опыт в повторяющиеся тета-последовательности и, таким образом, представляет окружение в сегментах или «фрагментах». Это предполагает потенциальный механизм когнитивной «фрагментации» опыта, который заключается в следующем.

Избирательная суммация выходов решетчатых клеток со специфической дирекциональной чувствительностью в каждом контуре (кольце) ECI-сети образует нейронные модули с различными пространственными масштабами. В частности, в примере, представленной на рис. 1 сети из 5 осцилляторных колец, формируются пять нейронных модулей с различными пространственными масштабами. В свою очередь, векторное представление каждого модуля определяется противоборством лево- и правосторонних групп клеток, в котором победитель определяет текущее направление вектора пространственной ориентации и интегрирование соответствующего отрезка траектории.

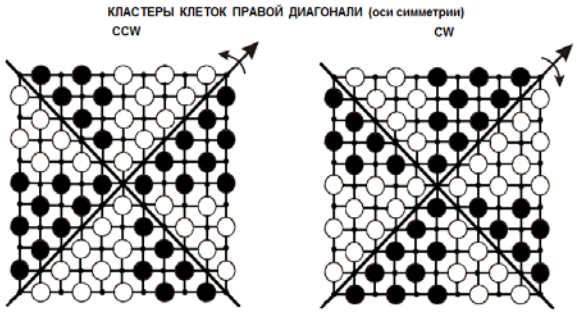


Рис. 1. Дирекционально чувствительные кластеры клеток ECI-сети, содержащей 5 осцилляторных колец, кодирующие паттерны входных сигналов. Большие черные кружки соответствуют активации информационных осцилляторов при поворотах против часовой стрелки (CCW) – *слева* и по часовой стрелке (CW) – *справа*. Черными точками между информационными единицами показаны референтные некодирующие единицы. Все связи между нейронами сети – тормозные. Паттерны импульсных возбуждающих сигналов соответствующей направленности поступают на зачерненные информационные осцилляторы

Какое биологическое значение может иметь модульная организация решетчатых клеток ECI-сети? Во-первых, данные, полученные в экспериментах на животных, говорят о том, что больше, чем одна ориентация решетки может быть выражена одновременно у одного и того же животного и неоднородности в ориентации решетки совпадают с неоднородностями в масштабе решетки. Во-вторых, экспериментально обнаружено, что популяции клеток с различными решетчатыми свойствами независимо отвечают на изменения в геометрии окружения, указывая, что модули решетчатых клеток могут быть закреплены отдельно на внешних источниках или границах. Дискретная, но распределенная топография решетчатой карты и автономия нейронных модулей имеют очевидные биологические преимущества [6, 12].

Как известно, открытие решетчатой активности клеток энторинальной коры вызвало появление многочисленных и разнообразных моделей [13–17]. Внимание исследователей сконцентрировано на двух аспектах: 1) механизмах генерации таких регулярных пространственных структур активности энторинальными клетками и 2) функциональном взаимодействии между решетчатыми клетками и клетками места. Между тем существует и другой важный фактор, связанный с самой нейросетевой архитектурой. Как показано нами в вычислительных экспериментах, коррелированная активность отдельных нейронных ансамблей ECI-сетей непосредственно связана с организацией схемы связей этих сетей и может иметь для организмов целый ряд функциональных преимуществ в поведенческом смысле [4]. Наконец, сведениям о нейронной организации, выполняющей пространственное кодирование и обработку сигналов окружения, недостает, на наш взгляд, понимания нейросетевой динамики как следствия нейросетевой архитектуры, выполняющей определенные функции пространственного познания. В частности, неясно, как пространственная информация о направлении и месте представлены на нейросетевом уровне и как обрабатываются эти базовые переменные навигации в гиппокампальной формации мозга.

Использованные нами в качестве базовой структуры моделирования нейронные сети с четным циклическим торможением (ECI-сети) не являются ни сенсорными, ни моторными. Это означает, что нейродинамика этих сетей отражает высокий уровень интеграции и обработки пространственной информации, предназначенной для дальнейшего перехода от ее хранения в кратковременной памяти (которой обладают ECI-сети) к долговременному хранению пространственных представлений посредством биофизических механизмов синаптической пластичности клеток места. Фазовая нейродинамика решетчатых клеток и пространственные представления клетками места, показанные в наших модельных экспериментах, отражают внутренние «ментальные» представления пространственного окружения в условиях существования двух координатных систем. С одной

стороны, это фазовые нейросетевые представления в эгоцентрической системе координат навигатора, а с другой – пространственные представления клетками места в аллоцентрической системе полярных координат. Добавим также, что когерентный характер фазовой нейродинамики в определенных состояниях сети хорошо приспособлен к узким временным окнам порядка нескольких миллисекунд, необходимых для срабатывания механизмов синаптической пластичности.

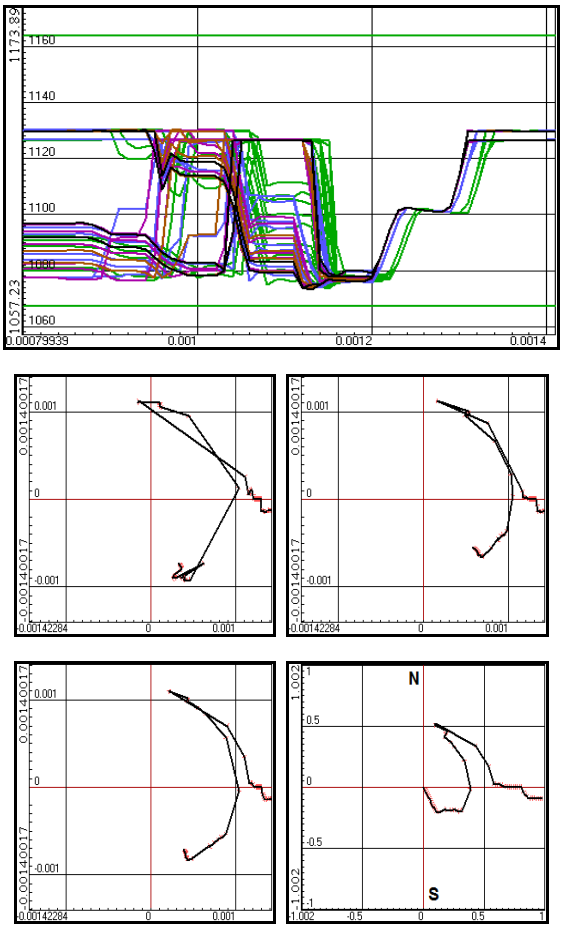


Рис. 2. Пример фрагментации пространственных представлений в ECI-сети, содержащей 5 осцилляторных колец. *Верхний ряд*: семейство кривых фазовых ответов сети при движении навигатора вдоль траектории вначале против часовой стрелки, затем по часовой стрелке. Горизонтальными серыми линиями показаны границы референтного тета-цикла. *Средний ряд*: слева – наиболее грубое представление внутреннего кольца, справа – внешнего кольца. *Нижний ряд*: слева – усредненное по всем кольцам векторное представление пространственного движения; справа – нормированная на единицу пространственная траектория со стартом движения в начале координат

Дирекционально чувствительные решетчатые клетки ECI-сети контролируются дистальными ориентирами, чтобы установить ориентацию эгоцентрической координатной системы. Первые в эпизоде последовательности сигналов локальных источников и сигналы трансляционной скорости движения устанавливают фазу координатной системы посредством специализированного кластера клеток в референтном тета-цикле. Последовательности сигналов дистальных источников, захваченные противоположным кластером чувствительных клеток, далее вступают в борьбу за установление фазы решетчатых клеток. История наблюдения фазовой динамики включает в себя 8–10 тета-циклов в референтном тета-цикле и отображается в многочисленных фазовых представлениях информационных единиц сети. Независимые фазовые представления правосторонних и левосторонних сегментов траектории, хорошо видные на графиках кривых фазовых ответов (рис. 2), есть отражение такого противоборства в установлении окончательной ориентации эгоцентрической системы во внешнем аллоцентрическом пространстве и положении клеток места в этом пространстве. В итоге, ECI-сеть плюс специализированная обработка ее выходов в соответствии с представленным алгоритмом продуцируют трансформации пространственных решеток в разреженные места, что позволяет контролировать число и местоположения полей места данного окружения.

В заключение отметим наиболее важные результаты вычислительных экспериментов и выводы, которые следуют из них.

1. Рассмотренные в наших экспериментах CW- и CCW-последовательности сигналов в эпизодах занимают раздельные временные окна в тета-цикле и имеют независимые фазовые представления, что позволяет сделать вывод о возможности использования их для параллельных представлений проксимальных и дистальных источников в задачах пространственной ориентации в данном окружении.

2. Выбор направления трансляционных и/или вращательных движений эгоцентрической системы происходит в результате внутреннего противоборства в сети фазовых представлений паттернов входных сигналов, определяемых стартовыми условиями интегрирования траектории движения и величиной межсобытийных временных интервалов в эпизоде. Неоднозначность пространственных представлений и зависимость от контекста – основной вывод о взаимодействии эгоцентрических и аллоцентрических представлений.

3. При малых скоростях движения (что может соответствовать исследовательскому поведению организмов) дисперсия фазовых представлений информационных единиц сети максимальна. В диапазоне средних значений трансляционной скорости движения фазовые представления обладают высоким синергизмом, т. е. носят когерентный характер, и соответствуют движению вдоль каждой из трех главных направлений энторинальной решетчатой системы клеток (ступеньки когерентности кривых фазовых ответов). Наконец, при высоких скоростях движения фазовые представления событийных последовательностей продуцируют выравнивание и закрепление двух координатных систем путем трансляции (смещения) и/или поворотов эгоцентрической системы в направлении дистального ориентира. Вывод: популяционная нейродинамика эпизодов навигационного поведения характеризуется многочисленны-

ми фазовыми превращениями, зависящими от контекстных условий, и всегда направлена на закрепление (привязку) эгоцентрической системы координат в аллоцентрической системе.

4. Результаты вычислительных экспериментов свидетельствуют о том, что она проходит через многочисленные стадии пространственных представлений в сети, прежде чем выходит на окончательный выбор пространственной траектории, а не мгновенно реагирует на внешнюю последовательность событий. Отсюда можно сделать вывод о том, что «ментальные» нейродинамические стадии в динамике сети закономерны для сложных мультисобытийных последовательностей паттернов входных сигналов и могут свидетельствовать о предварительной подготовке предстоящих поведенческих актов.

Литература

1. *McNaughton B.L., Battaglia F.P., Jensen O., Moser E.I., Moser M.B.* Path integration and the neural basis of the «cognitive map» // Nat. Rev. Neurosci. 2006. V. 7. P. 663–678.

2. *Moser E.I., Kropff E., Moser M.B.* Place cells, grid cells, and the brain's spatial representation system // Ann. Rev. Neurosci. 2008. V. 31. P. 69–89.

3. *Taube J.S.* The head direction signal: origins and sensory-motor integration // Annu. Rev. Neurosci. 2007. V. 30. P. 181–207.

4. *Hafting T., Fyhn M., Molden S., Moser M.B., Moser E.I.* Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex // Nature. 2005. V. 436. P. 801–806.

5. *Sargolini F., Fyhn M., Hafting T., McNaughton B.L., Witter M.P., Moser M.B., Moser E.I.* Conjunctive representation of position, direction, and velocity in entorhinal cortex // Science. 2006. V. 312. P. 758–762.

6. *Stensola H., Stensola T., Solstad T., Froland K., Moser M.-B., Moser E.I.* The entorhinal grid map is discretized // Nature. 2012. V. 492. P. 72–78.

7. *Цукерман В.Д.* Нелинейная динамика сенсорного восприятия, или Что и как кодирует мозг. Ростов н/Д. : РГУ, 2005. 195 с.

8. *Цукерман В.Д., Каримова О.В., Кулаков С.В., Сазыкин А.А.* Современные нейробиологические данные и новое в нейродинамике навигационного поведения // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. М. : Радиотехника, 2010. № 2. С. 17–27.

9. *Цукерман В.Д., Еременко З.С., Каримова О.В., Кулаков С.В., Сазыкин А.А.* Когнитивная нейродинамика двух стратегий навигационного поведения организмов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 96–108.

10. *Цукерман В.Д., Еременко З.С., Каримова О.В., Сазыкин А.А., Кулаков С.В.* Математическая модель пространственного кодирования в гиппокампальной формации. I. Нейродинамика решетчатых клеток // Математическая биология и биоинформатика. Пущино, 2012. Т. 7, № 1. С. 87–124.

11. *Gupta A.S., van der Meer M.A.A., Touretzky D.S., Redish A.D.* Segmentation of spatial experience by hippocampal theta sequences // Nat. Neurosci. 2012. V. 15. P. 1032–1039.

12. *Krupic J., Burgess N., O'Keefe J.* Neural representations of location composed of spatially periodic bands // Science. 2012. V. 337. P. 853–857.

13. *Burgess N., Barry C., O'Keefe J.* An oscillatory interference model of grid cell firing // Hippocampus. 2007. V. 17. P. 801–812.

14. *Hasselmo M.E.* Grid cell mechanisms and function: contributions of entorhinal persistent spiking and phase resetting // Hippocampus. 2008. V. 18. P. 1213–1229.

15. *Fuhs M.C., Touretzky D.S.* A spin glass model of path integration in rat medial entorhinal cortex // J. Neurosci. 2006. V. 26. P. 4266–4276.

16. *Jeewajee A., Barry C., O'Keefe J., Burgess N.* Grid cells and theta as oscillatory interference: Electrophysiological data from freely moving rats // Hippocampus. 2008. V. 18. P. 1175–1185.

17. *Giocomo L.M., Moser M.B., Moser E.I.* Computational models of grid cells // Neuron. 2011. V. 71. P. 589–603.

Расчет объема, величины и сложности сознания в нейрокомпьютере на базе математической теории QUALIA Джулио Тонони

В.Д. Цыганков

Научно-производственная компания «БИОМЕДИС», Москва
embrion10@list.ru

В последнее время увеличился объем научных работ, посвященных раскрытию тайн феномена сознания, а также не прекращаются попытки математического описания и моделирования его механизмов.

Очередной такой попыткой следует считать предложенную в 2004 году и постоянно совершенствующуюся математическую теорию [1], разработанную группой ученых во главе с Дж. Тонони (США). Объем и сила сознания согласно этой теории, т. е. характеристика жизненного опыта, или QUALIA, форма и сложность сознания выражаются графом (рис. 1) в дискретных булевых координатах многомерного пространства и в дискретном времени. Этот граф генерируется достаточно простой сетью Хопфилда, группой взаимодействующих формальных нейронов.

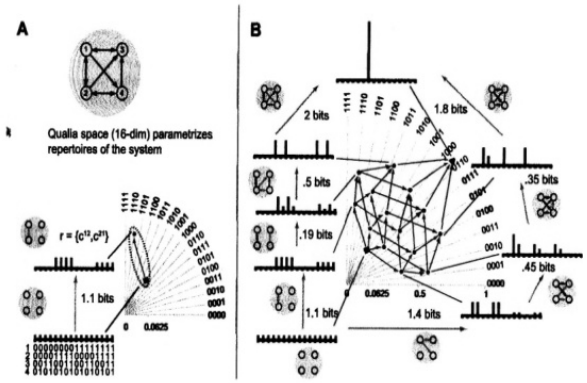


Рис. 1. Граф сознания, или QUALIA Дж. Тонони [1]

Если у Дж. Тонони граф генерируется математически на компьютере, и только с помощью субъективно задаваемой оператором конкретной конфигурации и величины рассчитанной сложности нейронной сети, то в нейрокомпьютере «ЭМБРИОН» [2] автоматическим генератором нейронных сетей с их многоканальными связями и ритмами возбуждения, т. е. генератором формы и размера QUALIA в тех же координатах, является его аппаратно реализованная в электронном нейрочипе генетическая матрица, идентичная матрице ДНК генетического кода всех живых организмов на Земле [3] (рис. 2).

В нашем случае объем жизненного опыта с его сложностью и многообразием, а также его сознательное отображение в виде графа (рис. 3) генерируется и детерминируется автоматически в реальном времени наследственным опытом, закодированным в информационном *n*-атоме; мотивацией, представленной в блоке выдвижения гипотез нейрокомпьютера; прижизненным опытом, записанным в регистре внутренней памяти, и актуальным воздействием окружающей среды через сенсорную матрицу.

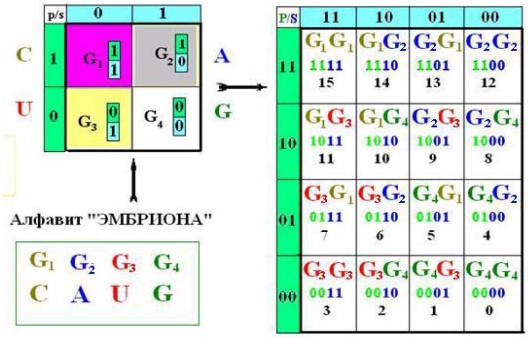


Рис. 2. Генетическая матрица нейрокомпьютера [3]

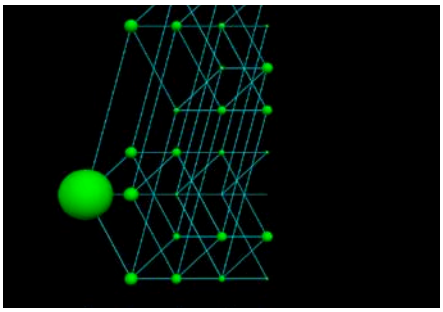


Рис. 3. Граф QUALIA нейрокомпьютера «ЭМБРИОН» В. Цыганкова [2]

Граф сознания нейрокомпьютера имеет сложность, исчисляемую размером нейронной сети в десятки тысяч нейронов с оперативно переключаемыми связями между ними, и отличается от QUALIA Дж. Тонони более 60 нейрофизиологическими и психологическими признаками ВНД и свойствами, которые в работах американских коллег еще не достигнуты.

В настоящей работе произведены предварительные расчеты объема, силы сознания и величины сложности или запутанности (entangled) по формулам Дж. Тонони [1], с использованием теории нелинейно коммутируемых дискретных марковских процессов и вероятностного алгоритма условного выбора Байеса.

Литература

1. *Tononi G.* An information integration theory of consciousness // BMC Neuroscience. 2004.

2. *Цыганков В.Д.* Нейрокомпьютер и его применение. М. : Сол Систем, 1993.

3. *Петухов С.В.* Матричная генетика, алгебры генетического кода, помехоустойчивость. М. ; Ижевск : НИЦ РХД, 2008.

Вариант архитектуры мыслительной системы, основанный только на принципах динамической теории информации

О.Д. Чернавская[1], В.П. Карп[2], А.П. Никитин[3]

[1]Физический институт РАН, Москва
[2]МИРЭА, Москва
[3]Институт общей физики РАН, Москва
olgadmitcher@gmail.com

Введение

Проблема моделирования человеческого мышления, или создания искусственного интеллекта, возникла одновременно с появлением компьютеров [1, 2]. Однако сейчас становится ясно, что на роль «субстрата» интеллекта могут претендовать только нейрокомпьютеры, работающие на основе парадигмы обучения, а не заданной детерминированной программы. Более того, излишне упрощенное понятие «формальный нейрон» сужает возможности стандартных нейропроцессоров и инициирует попытки ревизии основных парадигм нейрокомпьютинга (см. [3] и ссылки там же). Наша работа лежит в русле этого направления.

Еще одна дисциплина, имеющая прямое отношение к моделированию мышления – динамическая теория информации, ДТИ [4]. Отметим, что сама ДТИ сравнительно новая наука и ее основные положения заслуживают пояснения. *Информация* определяется [5] как запомненный выбор одного варианта из многих возможных и равноправных. При этом свободный выбор называется *генерацией* информации; навязанный выбор есть *рецепция* информации. Для генерации необходим так называемый перемешивающий слой, или случайное воздействие (шум). Выбор, возникший в социуме в результате договоренности, есть *условная* информация (например, язык).

В контексте ДТИ можно предложить следующее определение процесса мышления [6]: *мышление есть самоорганизующийся процесс записи (восприятия), хранения, кодирования, генерации и распространения информации без вмешательства извне.* Подчеркнем, что задачи записи и сохранения информации дуальны (дополнительны), поэтому эти функции должны быть распределены между двумя различными подсистемами.

Кроме известных научных подходов к моделированию человеческого мышления мы ориентируемся на указания, данные самой природой: человеческий мозг имеет два полушария, тесно связанных друг с другом и морфологически подобных. Функции их несколько различны: считается, что правое полушарие (ПП) отвечает за образное мышление и интуицию, а левое полушарие (ЛП) – за символьное и логическое мышление, хотя четкого определения того и другого нет. Более стройно выглядит концепция [7], которая состоит в том, что ПП отвечает за обучение и восприятие нового, а ЛП – за обработку уже известной информации.

Цель данной работы – предложить один из возможных вариантов конструкции из связанных нейропроцессоров разного типа, которая формируется в результате самоорганизации и способна решать перечисленные задачи мышления.

Система уравнений для описания процесса мышления

Как было показано в [3], нейрофизиологию и нейрокомпьютинг можно «примирить», если использовать концепцию «динамического формального нейрона». Тогда нейропроцессор должен описываться динамическими дифференциальными уравнениями, которые позволяют отслеживать динамику процесса обучения связей и специализации нейронов.

В работах [8, 9] детально исследовались «инструменты», т. е. типы процессоров, необходимые для решения перечисленных задач мышления. Было показано, что задачи записи и сохранения образной информации без ее осмысления решаются наиболее естественно при помощи линейных аддитивных ассоциативных процессоров типа Хопфилда [10] (распределенная память), причем необходимо вводить *две* (взаимодействующие) пластины, законы обучения которых различны. Для осмысления образной информации и координации действия системы необходимо образование *символов*, т. е. процессор типа Гроссберга [11, 12] с нелинейным (конкурентным) взаимодействием. Подобная система может быть описана уравнениями вида

$$\frac{dH_i^0(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_H}\left[H_i^0 + \beta_i(\{G_{\{i\}}^\sigma\})\cdot((H_i^0)^2 - 1) - (H_i^0)^3\right] + \sum_{i\neq j}^{n}\Omega_{ij}^0 H_j^0 + \sum_j^n \Lambda_{ij}^{typ\to 0}(t)H_j^{typ} + Z(t)\xi_i(t) + \sum_k \Psi_{ik}G_k(\{i\}) \quad , \quad (1)$$

$$\frac{dH_i^{typ}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_H}\left[H_i^{typ} + \beta_i(\{G_{\{i\}}^\sigma\})\cdot((H_i^{typ})^2 - 1) - (H_i^{typ})^3\right] + \sum_{i\neq j}^{n}\Omega_{ij}^{typ} H_j^{typ} + \sum_j^n \Lambda_{ij}^{0\to typ}(t)H_j^0 + \sum_k \Psi_{ik}G_k(\{i\}) \quad , \quad (2)$$

$$\frac{dG_k^\sigma(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_G}\left[-(\alpha_k - 1)\cdot G_k^\sigma + \alpha_k\cdot(G_k^\sigma)^2 - (G_k^\sigma)^3\right] - \sum_{l\neq k}\Gamma_{kl}\cdot G_k^\sigma G_l^\sigma + \sum_i \Psi_{ik}H_i^0 + \sum_i \Psi_{ik}H_i^{typ} + \sum_l \Xi_{kl}G_l^{\sigma+1} + \sum_l \Phi_{kl}G_l^\sigma \quad , \quad (3)$$

где H^0_i, H^{typ}_i, G_k^{σ} – переменные формальных динамических нейронов типа Хопфилда и Гроссберга соответственно; τ_H, τ_G, α_k, β_i — параметры.

Первые два уравнения относятся к пластинам типа Хопфилда, содержащим «первичные» (H^0) и «типичные» (H^{typ}) образы соответственно; β_i – параметр (порог возбуждения); $i, j = 1, ..., n$. Стационарные состояния переменных H равны +1 (активное) и –1 (пассивное), что обеспечивает эффект переключения элемента под влиянием соседей. Межпластинные связи Λ между образными подсистемами не должны быть симметричны, их назначение меняется на различных этапах формирования системы. Внутрипластинные связи Ω^0_{ij} и Ω^{typ}_{ij} модифицируются при обучении процессоров, причем законы обучения в пластинах различны.

Пластина H^0, (называемая также «*размытое» множество*) предназначена для *записи* всей информации, поступающей в систему, что обеспечивается законом обучения вида

$$\frac{d\Omega^0_{ij}(t)}{dt} \propto \frac{\Omega_0}{\tau_0}\left[H_i(t)+1\right]\left[H_j(t)+1\right], \quad (4)$$

т. е. связи, изначально слабые, усиливаются по мере обучения, в котором участвуют только активные нейроны (что соответствует известному в нейрофизиологии правилу Хебба [13]).

Вторая пластина H^{typ} предназначена для *хранения* и *распознавания* образов. Она соответствует оригинальному варианту, предложенному самим Дж. Хопфилдом [10]: все связи, изначально одинаково сильные, модифицируются при обучении так, что «неинформативные», т. е. не те, что связывают активные элементы, «выгорают» (их сила уменьшается):

$$\Omega^{typ}_{ij}(t) = \Omega_0\{1 - \frac{1}{2\tau_0}\int_0^t [1 - H_i(t')H_j(t')]\zeta(t')dt'\}. \quad (5)$$

Можно предложить следующую (самоорганизованную) схему решения задач записи и сохранения информации. Образы, воспринимаемые системой, записываются на пластине H^0. В каждом акте предъявления активируются близкие, но не всегда одни и те же нейроны. В итоге те связи, которые задействовались наиболее часто, постепенно усиливаются («чернеют»). По достижении некоторого *порога* Ω_{ij}, образ передается (прямыми межпластинными связями: $\Lambda^{0\to typ} = 1$, $\Lambda^{typ\to 0} = 0$) на пластину H^{typ}. Здесь происходит обучение пластины по принципу «отсечения ненужного» (5), в результате которого пластина будет *распознавать* информацию, поступающую на нее извне. Роль «учителя» при этом играет именно пластина H^0, а пластина H^{typ} формируется *после* обучения пластины H^0, на основе принципа «*почернения связей*».

Блок уравнений (3) относится к символам, индекс σ определяет положение символа в иерархии: $\sigma = 1$ соответствует символу типичного образа, $C_{\text{ТО}}$, $\sigma = 2$ символу класса $C_{\text{кл}}$, и т. д. Процесс формирования символов подробно рассматривался в [8, 9, 12], приведем кратко основные выводы.

Символ типичного образа ($C_{\text{ТО}}$) формируется *после* и *на основе* самого *ТО:* на пластине типа Гроссберга, благодаря конкурентному взаимодействию нейронов, составляющих типичный образ (первая строчка в уравнении (3)) выбирается только один, причем случайно – он и становится *символом* данного *ТО*. Связи Γ_{kl} обучаются по закону

$$\frac{d\Gamma_{kl}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau^{\Gamma}}\{G_k \cdot G_l(G_k - G_l)\} \quad (6)$$

с характерным временем обучения τ_Γ.

После завершения обучения внутрипластинных связей Γ_{ij} устанавливаются межпластинные связи «символ ↔ образ»:

$$\frac{d\Psi_{ik}(t)}{dt} \propto \frac{1}{\tau^{\Psi}} G_k(H_i + 1), \quad (7)$$

которые являются по сути *семантическими*: акт формирования символа есть акт *осознания* того факта, что данный набор нейронов отвечает конкретному реальному объекту.

После формирования символа $C_{\text{ТО}}$ и его семантических связей с *ТО* параметр α_k изменяется таким образом, что данный (*k*-й) нейрон исключается из конкурентной борьбы за другие образы: $\alpha_k \to \alpha_k(\{\Psi_{ik}\})$. После этого он приобретает возможность формировать уже не конкурентные, а «дружественные» связи с другими символами.

Символ класса $C_{\text{кл}}$ формируется аналогично, но в основе его лежат не образы, а те нейроны, которые составляют общие признаки данного класса. После формирования он оказывает *параметрическое* воздействие на образные нейроны $\beta_i \to \beta_i(G_{\text{кл}})$, обеспечивая тем самым *внимание.*

Связи между символом образа $C_{\text{ТО}}$ и символом класса $C_{\text{кл}}$ опосредованы нейронами-прародителями и являются по сути «неизбежными»:

$$\frac{d\Xi_{vk}(t)}{dt} \propto \frac{1}{\tau^{\Xi}} G_v\left[\sum_i^M (H_i + 1)\right] G_k. \quad (8)$$

Особую роль играют связи между символами, не опосредованные образными нейронами, а возникающие в результате эволюции (обучения) системы. Такие связи будем называть *абстрактными*. Они позволяют строить «образ-из-символов» – общность символов (несущих семантическую нагрузку), не соответствующую какому-то реально «увиденному» объекту, а созданную искусственно (или воображением). Эти связи строятся аналогично правилу Хебба (4) и запоминаются осознанно.

$$\frac{d\Phi_{vk}(t)}{dt} \propto \frac{1}{\tau^{\Phi}} G_v^{\sigma} G_k^{\sigma}. \quad (9)$$

Именно эти связи позволяют вводить *символы-понятия* ($C_{\text{П}}$), не связанные с определенными конкретными образами (например, «совесть», «гипотеза» и т. д.) и представляющие собой «абстрактное» знание.

Схема архитектуры мыслительной системы

Система уравнений (1)–(3), приведенная выше, носит общий характер; конкретная реализация

требует дополнительных предположений. Один из возможных вариантов — следующий набор принципов построения:

I. Система включает в себя две связанные подсистемы:

– ПП (правая подсистема) отвечает за генерацию информации, т. е. за обучение и творчество

– ЛП (левая подсистема) отвечает за рецепцию информации (из ПП и извне), т. е. за сохранение и обработку уже известной информации.

II. Шум (случайное самовозбуждение) есть в ПП и отсутствует в ЛП.

III. Архитектура (количество и взаиморасположение пластин) двух подсистем аналогична.

IV. Все алгоритмы отрабатываются (вплоть до достаточно сильных связей) в ПП и затем рецептируются (передаются по прямым связям между подсистемами) в ЛП. Иначе этот принцип может быть назван *принципом «почернения связей»*.

Первые два принципа следуют непосредственно из ДТИ, и тот факт, что они согласуются с гипотезой Голдберга [7], является приятным сюрпризом и косвенным подтверждением их правоты.

Схема системы, основанной на этих четырех принципах, приведена на рис. 1.

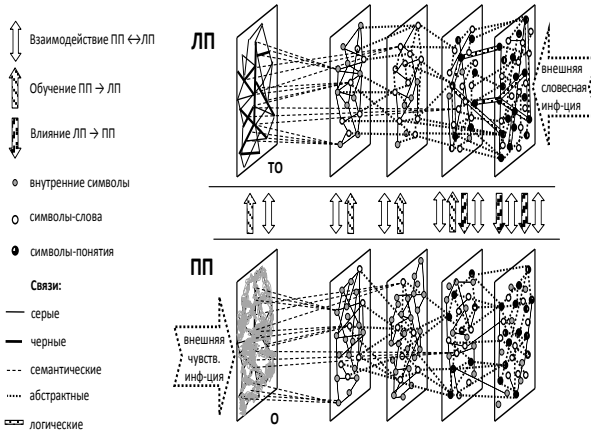


Рис. 1. Схема архитектуры мыслительной системы

Здесь в результате самоорганизованной эволюции системы формируются, причем последовательно, разные уровни (типы) информации:

• *Первичные образы* (О). Пластина первичных образов относится к подсистеме ПП и содержит всю образную информацию, поступающую в данную систему через «органы чувств», т. е. рецепторы. Внутрипластинные связи обучаются «по Хеббу» (4) и варьируются от серых до черных. Функция: запись всей «чувственной» информации.

•*Типичные образы* (ТО), или образная информация *для* хранения. Пластина ТО «заполняется» по мере обучения (с учителем, роль которого играет пластина О) теми образами, связи которых становятся черными; все другие (серые) связи отмирают по закону обучения (5). Функции: сохранение информации, отобранной для запоминания; распознавание.

• *Символьная* (*семантическая*) *информация «символ ↔ образ»*. Символы (С), сформированные на основе типичных образов, несут семантическую нагрузку, т. е. осознание того факта, что данная цепочка активных нейронов описывает один реальный объект. На этом же уровне появляются и стандартные символы, или символы-слова (СС), воспринятые извне для обозначения тех же конкретных объектов. Функции: кодирование, обеспечение прямого и параметрического взаимодействия пластин (обработка информации) и осмысленность процесса.

• *Абстрактная* (*вербализованная*) *информация*. Инфраструктура символов С, СС и их связей $С \leftrightarrow С$ и $С \leftrightarrow СС$, не опосредованных образами, т. е. нейронами-прародителями пластин Хопфилда. Такой тип информации мы называем абстрактной: она не ассоциируется с конкретными объектами, а возникает в обученной системе как результат взаимодействия всех пластин (не «чувственное», а «выводное» знание). Именно такая информация может быть *вербализована*, т. е. выражена в символьной форме при помощи условленного в данном обществе языка. При этом сам язык, т. е. правила связи символов-слов СС (грамматика и синтаксис), воспринимается (рецептируется) извне, непосредственно в ЛП, где и хранится. Функции: коммуникация с аналогичными системами («объяснять словами»), осознание; рецепция символьной (вербальной) информации.

Таким образом, вся система растет от нижних образных уровней информации, через семантическую (понятную лишь данной индивидуальной системе) к верхним уровням абстрактной информации, которая уже может быть вербализована и понятна данному сообществу. При этом на каждом этапе формирования нового типа информации происходит одно и то же: связи возникают в ПП и отрабатываются там до состояния черных; только после этого презентатор информации передается (межподсистемными связями Λ) в ЛП. Иными словами, происходит акт обучения по принципу почернения связей, где в роли «учителя» выступает ПП. Важно, что в результате на каждом этапе (кроме последних уровней) часть информации теряется, точнее, не переходит на следующий уровень, а остается на предыдущем в роли служебной или скрытой информации данной индивидуальной системы.

По сути, представленная схема является тем самым «когнитомом», о котором говорит К.В. Анохин [14]: наш набор связей — это именно реализованные степени свободы, т. е. те связи, которые формируются в данной индивидуальной системе в процессе ее эволюции, причем мы можем проследить, как именно они образуются.

Решение задач

Распознавание

Задачи распознавания отрабатываются в образных пластинах. Постановка задачи сводится к активации в размытом множестве $\boldsymbol{H}^{\mathbf{0}}$ в ПП некоторого набора нейронов (экзаменуемый образ), который записывается там «как есть», т. е. вначале

слабыми («серыми») связями. Далее этот образ передается прямыми (межподсистемными) связями во множество типичных образов $\boldsymbol{H}^{typ}$ в ЛП, где и распознается, т. е. ассоциируется с символом. Для проверки решения этот символ необходимо передать в ПП для декомпозиции и сравнения с экзаменуемым образом. Так возникает *петля*, по сути аналогичная той, которая предлагается в работах В.Г. Яхно [15]:

$$\boldsymbol{H}^{0}(\text{ПП}) \rightarrow \boldsymbol{H}^{typ}(\text{ЛП}) \rightarrow \boldsymbol{G}^{0}(\text{ЛП}) \rightarrow \boldsymbol{G}^{0}(\text{ПП}) \rightarrow \boldsymbol{H}^{0}(\text{ПП}).$$

Подчеркнем, что данная система способна обработать и распознать даже *новый* объект, но только с участием размытого множества $\boldsymbol{H}^{0}$.

Классификация

В данной схеме присутствуют оба типа классификации: и объективная, и целевая. Формирование объективной классификации связано с последовательным формированием пластин символов все более высокого уровня. Подчеркнем, что это процесс динамический: количество символьных пластин не фиксировано, они подключаются по мере необходимости.

Целевая классификация не связана с формированием специальных пластин и идет не «снизу вверх», а, напротив, «сверху вниз»: постановка цели эквивалентна активации соответствующего символа (достаточно высокого уровня). Это приводит к предактивации (или вниманию) всех символов и образов, имеющих с ним связи.

Прогноз

Распознавание динамического процесса (прогноз) требует большего развития системы, чем распознавание объекта, а именно участия символов более высокого уровня, нежели символы образов. Динамический процесс распознается по «кадрам», т. е. фиксированное состояние объекта в данный момент времени t_i соответствует одному образу, который получает собственный символ. Для того чтобы система воспринимала цепочку образов, накопившуюся от момента t_0 до t_n, как определенный динамический процесс, необходимо, чтобы цепочка соответствующих символов образовала достаточно устойчивые связи так, чтобы образовался символ более высокого уровня — символ *процесса*.

Заключение

Представлена схема конструкции из нейропроцессоров разных типов, предназначенная для решения задач мышления, определяемых в контексте динамической теории информации: записи, сохранения, обработки, генерации и распространения информации. Принципиальной особенностью схемы является наличие двух взаимодействующих подсистем, одна из которых (ПП) отвечает за генерацию информации (обучение и творчество), другая (ЛП) – за хранение и обработку уже известной информации. Такое разделение функций характерно именно для правого и левого полушарий человеческого мозга. Иными словами, функциональная межполушарная асимметрия в данной схеме естественно воспроизводится.

Показано, что различные типы информации (т. е. типы связей) в рамках данной схемы должны возникать в результате самоорганизованной эволюции системы, причем *последовательно*: от образной информации на низком уровне развития, через семантическую (осмысленную) информацию к абстрактным связям и понятиям. Подобную же эволюцию проходит человек в процессе взросления.

Подчеркнем, что возможны иные варианты построения подобной системы, основанные на других принципах самоорганизации. Более того, разнообразие вариантов может быть подходом к решению проблемы индивидуальности человеческого мышления.

Литература

1. *Turing A.M.* Computing machinery and intelligence // Mind. 1950. V. 59, № 236.

2. *Penrose R.* Shadows of the Mind. N.Y. ; Oxford : Oxford University Press, 2005. P. 457.

3. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Никитин А.П.* О математических моделях нейропроцессоров // Материалы конференции «Нелинейная динамика в прикладных исследованиях». Н. Новгород, 2013.

4. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация : Динамическая теория информации. М. : УРСС, 2004. С. 287.

5. *Кастлер Г.* Возникновение биологической организации. М. : Мир, 1967.

6. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.* Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Ч. I : Основные цели и задачи мышления // Сложные системы. 2012. № 1. С. 25–41.

7. *Голдберг Э.* Парадокс мудрости. М. : УРСС, 2005. С. 380.

8. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.* Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Ч. II : Понятия образ и символ как инструменты моделирования процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Сложные системы. 2012. № 2. С. 47–67.

9. *Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Чернавская О.Д.* Схема конструкции из нейропроцессоров, способной реализовывать основные функции мышления и научного творчества // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. № 6. С. 21–35.

10. *Hopfield J.J.* Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // PNAS. 1982. V. 79. P. 2554.

11. *Grossberg S.* Studies of Mind and Brain. Boston : Riedel, 1982 ; The adaptive brain. Amsterdam : Elsevier : North-Holland, 1987.

12. *Чернавский Д.С., Щепетов Д.С., Чернавская О.Д.* Анализ динамических моделей процессора локализации образа // Материалы конференции «Нелинейная динамика в прикладных исследованиях». Н. Новгород, 2013.

13. *Hebb D.O.* The organization of behavior: a neuropsychological theory. N. Y., 2002. 457 p. (Оригинальное издание — 1949).

14. *Анохин К.В.* Когнитом: теория реализованных степеней свободы мозга // Труды 5-й Межд. конф. по когнитивной науке. Калининград, 2012.

15. *Яхно В.Г.* Проблемы на пути конструирования симулятора живых систем // Труды конф. «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». Н. Новгород, 2011. С. 246–249.

О математических моделях нейропроцессоров

О.Д. Чернавская, Д.С. Чернавский

Физический институт РАН, Москва
olgadmitcher@gmail.com

Введение

Развитие когнитивной науки в последние годы связано с активным применением мультидисциплинарного подхода [1–4]. Действительно, для понимания мышления человека необходимо участие психологии [5], нейрофизиологии [6, 7], лингвистики [8, 9], нейрокомпьютинга [10]. В этой связи на первый план выходит проблема языка, т. е. выработка *общей терминологии*, существующей на стыке этих дисциплин. Причем не так страшно, если термины одной дисциплины не совпадают с другой, эта проблема решается простым «сложением» терминов. Более сложная проблема заключается в том, что одни и те же термины употребляются в *разных смыслах.*

Особую остроту эта проблема приобретает в контакте нейрофизиологии и нейрокомпьютинга. Последняя дисциплина возникла именно в попытке использования возможностей современных компьютеров для симуляции процессов, происходящих в мозгу человека. Именно поэтому терминология во многом повторяла язык, принятый в нейрофизиологии: нейроны, связи, импульс, порог и др. Действительно, компьютер, соединенный с парадигмой *обучения* (вместо исполнения определенных, привнесенных извне, программ) выглядит самым перспективным кандидатом на «субстрат» мыслящего механизма. Однако существующие нейропроцессоры создавались как инструменты для решения *определенного круга задач*, в то время как человек может и должен решать самые разнообразные и неожиданные задачи.

В процессе решения конкретных задач выяснилось, что понятие «нейрон» может быть сильно упрощено, что повышает эффективность и быстродействие такого «инструмента». С этого момента нейрокомпьютинг выделился в самостоятельную дисциплину, достигшую значительных успехов в решении определенных прикладных задач. Нейрофизиологи, в свою очередь, сочли такой подход излишне упрощенным и вульгаризованным и сделали акцент на сложность строения и функций одного конкретного нейрона (концепция «нейрон – организм в организме» [6]).

В своих работах [11–13] мы использовали так называемый естественно-конструктивистский подход, основанный на динамической теории информации (ДТИ, [14]), теории распознавания [15] и нейрокомпьютинге [16]. Однако необходимо подчеркнуть, что последняя составляющая нами понимается в смысле, отличном от стандартного подхода, в частности, к понятию «формальный нейрон». Отметим, что это понятие именно в последнее время подвергается активной ревизии [17–19]. Цель данной работы – предложить и обсудить нашу концепцию «формальный динамический нейрон» и продемонстрировать ее возможности в реализации нейропроцессоров.

Понятие «формальный нейрон»

Начиная с работы Мак Каллоха и Питтса [20], нейрокомпьютинг базируется на трех парадигмах:

- формальный нейрон есть ***дихотомический элемент***, способный существовать в пассивном или активном состоянии;
- нейроны и связи между ними рассматриваются как ***отдельные самостоятельные*** объекты, причем именно ***связи способны обучаться***;
- пассивное состояние может меняться (скачком) на активное при внешнем воздействии, превышающем некоторый ***порог возбуждения***.

Подчеркнем, что динамика процесса и промежуточные состояния во внимание не принимаются. С точки зрения нейрофизиологии такое представление является, безусловно, вульгарным (излишне упрощенным). Здесь нейрон и его связи (аксоны, синапсы, дендриты) рассматриваются как единое целое. Реальный нейрон – гораздо более сложное устройство, плоды жизнедеятельности которого (метаболиты) влияют как на мозг, так и на весь организм; роль нейрона отнюдь не сводится к рефлекторному ответу на внешнее воздействие [6]. Тем не менее основная функция нейрона – формировать и проводить электрические импульсы, причем известно несколько существенно различных динамических *режимов* такого процесса – одиночный импульс («спайк»), автоколебания, пакет импульсов («спайк-трейн») и т. п.

Несмотря на сложность нейрона, было предложено несколько его моделей, весьма успешно описывающих динамику мембранного потенциала (см. [7, 21]). До сих пор наиболее биологически-релевантной считается модель Ходжкина – Хаксли [22], изначально предложенная для описания прохождения электрического импульса по аксону. Эта модель хорошо описывает форму одиночного импульса (спайка), а также множество других характеристик спайковой динамики нейрона. Однако сравнительная сложность этой модели (каждый нейрон описывается четырьмя уравнениями для 4 переменных) ограничивает ее применение при симуляции динамики нейронных сетей, состоящих из большого ($>10^3$) числа нейронов.

Позже эта модель была редуцирована (с потерей некоторых нюансов) до двух уравнений в работах Фитц-Хью и Нагумо [23, 24]. Рассмотрим эту модель подробнее.

Основной динамической переменной является мембранный потенциал V, но для адекватного описания сложных динамических режимов необ-

ходимо ввести еще одну внутреннюю переменную Y, которая обеспечивает стабилизацию режимов через отрицательную обратную связь:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\tau^V}\{a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 + a_0 - b_0 Y + \mathrm{I}_{ext}\}, \quad (1)$$

$$\frac{dY}{dt} = \frac{1}{\tau^Y}\{b_1 V - b_2 Y\}, \quad (2)$$

где $a_{0,1,2,3}$ и $b_{0,1,2}$ – параметры, τ^V, τ^Y – характерные времена активации; I_{ext} – внешнее воздействие. Фазовый портрет системы (в отсутствие внешнего воздействия: $\mathrm{I}_{ext} = 0$) для разных динамических режимов представлен на рис. 1.

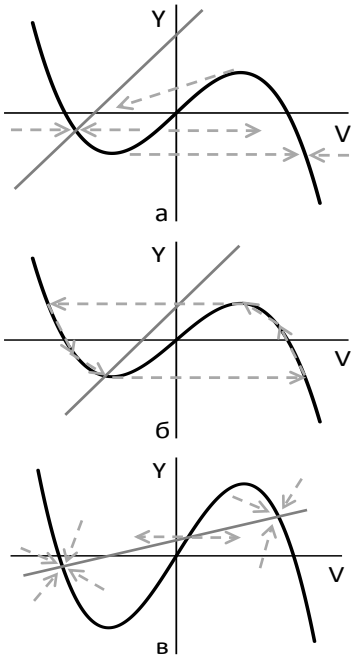


Рис. 1. Фазовый портрет модели Фиц-Хью – Нагумо для трех разных режимов: *а* – спайк; *б* – автоколебания; *в* – бистабильный режим. Сплошные линии соответствуют изоклинам $dV/dt = 0$ и $dY/dy = 0$; стрелками показаны направления движения изображающей точки

Кубическая нелинейность приводит к тому, что V-изоклина ($dV/dt = 0$) имеет N-образную форму, причем внутренний участок ее *нестабилен*. В зависимости от соотношений параметров и характерных времен стационарное состояние V_0 («*rest point*», $dV/dt = 0$, $dY/dt = 0$) может располагаться на разных участках N-образной кривой, что приводит к существенно различающейся динамике переменной V.

В том случае, когда стационар располагается на устойчивом участке (рис. 1, *а*), реализуется *спайковый* режим. Поскольку этот режим играет большую роль в нейрофизиологии, остановимся на нем подробнее. Независимо от начального положения изображающей точки любая траектория стремится в стационар, который соответствует состоянию покоя. Включение внешнего воздействия I_{ext} фактически соответствует смещению начального состояния $V(0)$ вправо от стационара V_0. Если это смещение не велико, притяжение устойчивого стационара возвращает траекторию назад в состояние V_0. Если же I_{ext} таково, что изображающая точка достигает левого экстремума ($dY/dV = 0$), траектория «срывается»: происходит перескок на правую (стабильную) ветвь V-изоклины, что соответствует *всплеску потенциала* (*spike*). После этого потенциал сохраняется на относительно высоком уровне в течение того времени, пока изображающая точка движется по стабильному участку изоклины в направлении стационара. При достижении правого максимума происходит обратный срыв в область малых значений $V < V_0$ и наступает *рефрактерный период*, в результате которого система снова возвращается в состояние покоя.

В том случае, если стационар попадает на *границу* центрального участка V-изоклины, т. е. совпадает с точкой экстремума $dY/dV = 0$ (рис. 1, *б*), он теряет стабильность, и устойчивым оказывается *предельный цикл* (серый пунктир). Тогда реализуется режим автоколебаний, что соответствует (с некоторыми оговорками) пачке импульсов (режим *spike train*).

Наконец, в том случае, когда стационарное состояние попадает на центральную часть изоклины, оно оказывается *абсолютно неустойчивым*. Однако если при этом наклон Y-изоклины падает (что отвечает ослаблению связи между переменными), появляются два дополнительных, причем устойчивых, стационара и система входит в бистабильный режим (рис. 1, *в*). При этом поведение системы существенно отличается от предыдущих режимов: изображающая точка всегда находится в зоне притяжения одного из стационаров и переходит из одного состояния в другое только под воздействием I_{ext}, превышающем некоторый порог (отделяющий положение стационара от экстремума).

В специальном случае $b_1 = b_0 = b = 0$ две переменные оказываются полностью расцепленными, система редуцируется до одного уравнения для переменной, соответствующей (по смыслу) мембранному потенциалу. Отметим, что пороговый характер поведения системы в этом случае аналогичен спайковому режиму, но понятие «рефрактерный период» здесь теряется.

Таким образом, модель такого типа оказывается способной описать, при определенном соотношении параметров, любой из реальных режимов динамического поведения нейрона. Однако в реальных процессах режимы могут сменять друг друга, но *не могут сосуществовать*. Тогда напрашивается следующий шаг на пути редукции: зафиксировав параметры, обеспечивающие нужный режим, перейти к одному уравнению для некоторой обобщенной переменной, описывающей состояние нейрона в данный момент времени. Кроме того, заменив внешнее воздействие I_{ext} на суммарный сигнал от соседей, приходим фактически к модели автономной сети из формальных, но *динамических* нейронов. Однако в случае необходимости учета разных режимов функционирования необходимо возвращаться к более сложной (двухкомпонентной) модели динамического нейрона.

Подчеркнем, что в такой форме модель взаимодействия формальных, но *динамических* нейронов оказывается в равной степени далека и от нейрокомпьютинга, и от биофизического подхода, однако именно такое описание представляется наиболее адекватным при использовании нейронных процессоров для решения задач мышления.

Нейропроцессоры на основе «формальных динамических нейронов»

Итак, под ***динамическим формальным нейроном*** мы будем понимать (в первом приближении) бистабильный элемент, способный находиться в двух стационарных состояниях — пассивном (–1 или 0) и активном (+1), суммировать входящие сигналы и переходить из одного состояния в другое при определенном соотношении суммарного сигнала и порога возбуждения данного нейрона.

Под ***процессором*** мы будем понимать ***пластину***, населенную ***динамическими формальными нейронами***. Понятие «пластина» несет несколько смысловых нагрузок, причем основная из них в том, что внутрипластинные и межпластинные связи могут и должны *обучаться по-разному*, и выполнять разные функции. Это же относится и к самим пластинам: существует несколько типов нейропроцессоров, отличающихся по характеру взаимодействия нейронов внутри пластины. Комбинация нескольких различного типа нейропроцессоров дает возможность воспроизводить эффекты, спектр которых весьма широк и далеко превосходит возможности обычных микросхем.

Продемонстрируем особенности выбранного динамического подхода на примере модели известного процессора Хопфилда [25]. Это процессор с линейным аддитивным взаимодействием нейронов, обеспечивающий ассоциативную *распределенную память*. Последнее означает, что каждый конкретный объект, предъявленный системе, возбуждает определенную цепочку нейронов (*образ*), так что впоследствии «повреждение» одного или нескольких нейронов не влияет на целостность образа.

Математическая модель процессора Хопфилда может быть представлена в виде

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

где $H_i(t)$ – переменная, описывающая состояние i-го нейрона; τ_i^H – характерное время активации; β_i – параметр, определяющий порог возбуждения; Ω_{ij} – матрица связей между нейронами; $i, j = 1, ..., n$. Подчеркнем, что уравнение (3) фактически совпадает с уравнением (1) для мембранного потенциала V_i при определенном выборе параметров ($a_0 = -a_2 = \beta$, $a_1 = -a_3 = 1$; $b_{0,1,2} = 0$) и замене внешнего воздействия на суммарный сигнал от соседей. В результате такого выбора стационарные состояния переменных H_i равны +1 (активное) и –1 (пассивное), что обеспечивает эффект «переключения» элемента под влиянием соседей. Связи между нейронами Ω_{ij} модифицируются в процессе *обучения.*

Отметим, что модель (3) квазипотенциальна, т.е. может быть представлена в виде

$$\frac{dH_i}{dt} = -\frac{1}{\tau_i^H}\frac{\partial \Pi(H_i,...H_n)}{\partial H_i}; \quad i = 1, ..., n, \quad (4)$$

где

$$\Pi(H_1,...H_n) = -\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{2}H_i^2 - \frac{1}{4}H_i^4 - \beta\cdot(\frac{1}{3}H_i^3 - H_i) + \sum_j \Omega_{ij}H_iH_j\right]. \quad (5)$$

Эти уравнения аналогичны уравнениям движения шарика единичной массы в потенциальном поле $\mathbf{\Pi}(H_i)$, причем в *вязкой* среде – поэтому в (3) фигурирует первая производная по времени (скорость шарика), а не вторая (ускорение). Это поле создается в процессе обучения, т. е. формирования связей Ω_{ij}, причем чем сильнее и многочисленнее связи, тем более разнообразен потенциал. Поле $\mathbf{\Pi}(H_i)$ часто называют также *ландшафтом*, и в этом контексте употребляют понятия «лунки», «водоразделы» (сепаратрисы), «каналы» и т. п. Координаты шарика в данный момент соответствуют положению изображающей точки в n-мерном фазовом пространстве модели (т. е. набору значений переменных $\{H_i\}$, $i = 1, ..., n$), которое, по сути, совпадает с *пространством признаков*. Такое представление позволяет рассматривать не судьбу отдельного нейрона, а всю пластину как единую взаимодействующую систему.

Кроме того, на этом языке можно просто и наглядно проиллюстрировать понятие «*порог возбуждения*» и роль параметра β. На рис. 2 изображен потенциал $\Pi(H_i)$ для i-го нейрона в необученной системе ($\Omega_{ij} = 0$).

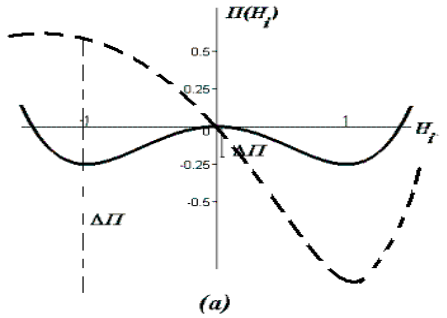


Рис. 2. Потенциал $\Pi(H_i)$ в случае β = 0 (сплошная кривая) и β = 1 (пунктир)

Энергетический *барьер* между стационарными состояниями, т. е. энергия, необходимая шарику, чтобы перескочить из одного состояния в другое, соответствует тому, что мы называем ***порог возбуждения*** $\mathbf{\Delta\Pi}$. Видно, что при β = 0 (рис. 2, сплошная линия) оба стационарных состояния, +1 и –1, энергетически эквивалентны, и порог возбуждения $\mathbf{\Delta\Pi}$ = 1/4. Если же β = 1 (рис. 2, пунктир), стабильным оказывается только активное (+1) состояние, причем его «уровень энергии» углубляется. При этом пассивное состояние (–1) теряет стабильность: шарик переходит в состояние *безразличного равновесия.* Это обстоятельство может быть использовано как инструмент реализации парадигмы внимания [14].

Заключение

Из изложенного ясно, что понятия «формальный нейрон», используемое в стандартном нейрокомпьютинге, и «формальный динамический нейрон», на котором основан наш «естественно-конструктивистский» подход, существенно отличаются. Соответственно отличаются и модели нейропроцессоров, причем важно, что наш подход позволяет проследить ***динамику*** превращений состояний нейрона. Показано, что модель процессора Хопфилда фактически представляет собой частный случай модели Фиц-Хью – Нагумо при определенном выборе параметров.

Показано, что динамические модели процессоров позволяют осуществлять *параметрическое* воздействие на отдельные нейроны, что может быть использовано для реализации парадигмы *внимания*.

Еще большее значение имеет применение динамических моделей для реализации *процессора локализации образа* [26], чему будет посвящено отдельное исследование [27].

Литература

1. *Шамис А.С.* Пути моделирования мышления. М. : КомКнига, 2006. 445 с.
2. *Laird J.E.* The Soar Cognitive Architecture. MIT Press, 2012. 368 p.
3. *Рабинович М.И., Мюезинолу М.К.* Нелинейная динамика мозга: эмоции и интеллектуальная деятельность // УФН. 2010. Т. 180, № 4. С. 371–387.
4. *Чернавский Д.С.* Проблема происхождения жизни и мышления с точки зрения современной физики // УФН. 2000. Т. 170, № 2. С. 157–183.
5. *Солсо Р.* Когнитивная психология. СПб. : Питер, 2006. 589 с.
6. *Александров Ю.И. и др.* Нейрон. Обработка сигналов. Пластичность. Моделирование : фундаментальное руководство. Тюмень : Изд. ТГУ, 2008.
7. *Анохин К.В. и др.* Современные подходы к моделированию активности культур нейронов in vitro // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7, № 2. С. 372–397.
8. *Черниговская Т.В.* Мозг и язык: врожденные модули или обучающаяся сеть? // МОЗГ. Фундаментальные и прикладные проблемы / под ред. акад. А. И. Григорьева. М. : Наука, 2010. С. 117–127.
9. *Deacon T.W.* Coevolution, devolution, and language // Proc. of V Int. Conf. on Cognitive Science. Kaliningrad, 2012. P. 22.
10. *Haykin S.S.* Neural Networks and Learning Machines. Prentice Hall, 2009. 906 p.
11. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Рожило Я.А.* Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Ч. 1 : Основные цели и задачи мышления // Сложные системы. 2012. № 1. С. 25–41 ; Ч. 2 : Понятия «образ» и «символ» как инструменты моделирования процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Сложные системы. 2012. № 2. С. 47–67 ; Ч. 3 : Один из вариантов конструкции нейропроцессоров для моделирования процесса мышления // Сложные системы. 2012. № 3. С. 25–36.
12. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.* О роли понятий «образ» и «символ» в моделировании процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 5–20.
13. *Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Чернавская О.Д.* Схема конструкции из нейропроцессоров, способной реализовывать основные функции мышления и научного творчества // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. № 6. С. 21–35.
14. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация : Динамическая теория информации. М. : УРСС, 2004. 287 с.
15. *Бонгард М.М.* Проблемы узнавания. М. : Наука, 1967. 320 с.
16. *Ежов А.А., Шумский С.А.* Нейрокомпьютинг и его применения. М. : МИФИ, 2008. 222 с.
17. *Витяев Е.В.* Формальная модель нейрона, обеспечивающая непротиворечивость предсказаний // Труды VI Международной конференции по нейрокибернетике ICNC. 2012. С. 81–84.
18. *Izhikevich E.M., Edelman G.M.* Large-scale model of mammalian thalamocortical systems // Proceedings of the national academy of sciences. 2008. V. 105, № 9. P. 3593–3617.
19. *Филиппов В.С.* Доклад на сессии РАН «Память в биологических, социогуманитарных и технических системах», 2–3 апреля 2013 г., НБИКС-центр НИЦ «Курчатовский институт», Москва.
20. *McCulloch W.S., Pitts W.* A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity // Bulletin of Mathematical Biophysics. 1943. V. 5. P.115.
21. *Izhikevich E.M.* Dynamical Systems in Neuroscience : The Geometry of Excitability and Bursting. Cambridge, MA : MIT Press, 2007. 497 p.
22. *Hodgkin A.L., Huxley A.F.* A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // J. Physiology. 1952. V. 117, № 4. P. 500–544.
23. *Fitz Hugh R.* Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophys. J. 1961. V.1. P. 445.
24. *Nagumo J., Arimoto S., Yashizawa S.* An active pulse transmission line simulating nerve axon // Proc. IRE. 1962. V. 50. P. 2062.
25. *Hopfield J.J.* Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // PNAS. 1982. V. 79. P. 2554.
26. *Чернавская О.Д., Никитин А.П.* О возможных механизмах формирования символов в системе связанных нейропроцессоров // Труды конференции ICNC-201. Ростов, 2012. С. 212–215.
27. *Щепетов Д.С, Чернавский Д.С.* Анализ динамической модели процессора локализации образа // Настоящий сборник. Н. Новгород, 2013. С. 205–208.

Естественно-конструктивистский подход к моделированию мышления: текущее состояние и проблемы

Д.С. Чернавский[1], В.П. Карп[2], А.П. Никитин[3],
Д.С. Щепетов[1], О.Д. Чернавская[1]

[1]Физический институт РАН, Москва
[2]МИРЭА, Москва
[3]Институт общей физики РАН, Москва
olgadmitcher@gmail.com

В настоящее время интерес к проблеме искусственного интеллекта вновь переживает несомненный подъем, на сей раз в духе синергетического подхода (см. [1–4] и ссылки там же). Единого направления еще не выработано, но существуют определенные «пути моделирования мышления». Настоящая работа лежит в русле так называемого естественно-конструктивистского подхода, базирующегося на нейрокомпьютинге (см. [5] и ссылки там же), теории распознавания (см. [6] и ссылки там же) и динамической теории информации (ДТИ, см. [7, 8]).

В работе [9] были исследованы основные принципы процесса мышления с позиций ДТИ и было предложено определение мышления как самоорганизующегося процесса записи (восприятия), сохранения, обработки, а также генерации и распространения новой информации без вмешательства извне.

В работе [10] анализировалась возможность реализации перечисленных задач мышления средствами известных нейропроцессоров и рассматривались общие принципы построения «мыслительной системы», состоящей из нейропроцессоров разного типа. Было показано, что задачи записи и сохранения информации дуальны (т. е. дополнительны и в определенном смысле противоречивы), следовательно для их осуществления принципиально необходимы две разные подсистемы, функции которых могут исполнять две пластины хопфилдовского типа [11]. Нейропроцессоры типа Гроссберга [12] играют ведущую роль в формировании символьной (кодовой) информация, которая является прообразом условной информации и необходима для координации работы всей системы. Конкретные схемы построения мыслительной системы в публикациях [9, 10] не рассматривались.

Цель данной работы – обсудить текущее состояние и проблемы, возникающие в данном подходе. Среди таковых можно выделить:

1. Понятие «формальный нейрон» и его соотношение с реальным. Очевидно, что формальный нейрон, принятый в нейрокомпьютинге, является понятием слишком грубым, гораздо более адекватным описанием нейрона представляется модель Фиц-Хью – Нагумо [13, 14] или ее модификации (см., например, [15] и ссылки там же). Однако можно рассмотреть некую промежуточную динамическую конструкцию, которую мы называем «формальный динамический нейрон» [16].

2. Процесс формирования символа типичного образа. Он имеет чрезвычайно большое значение для моделирования мышления, поэтому мы провели подробный (в частности, параметрический) анализ для случая «примитивного» образа из двух нейронов и распространили его результаты на случай многих нейронов. На этом пути были получены интересные результаты [17].

3. Рассматривались две возможных архитектуры аппарата мышления (АМ), способных решать основные задачи мышления. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Одна из них рассматривалась и ранее в работе [18], причем было показано, что при сопоставлении ее структуры с реальным органом (пластины Рекседа спинного мозга [19]) было обнаружено удивительное сходство.

4. Проблема обучения речи также является центральной при моделировании мышления человека. Один из возможных вариантов ее решения заслуживает обсуждения.

Подчеркнем, что все вышеназванные проблемы являются, с одной стороны, весьма важными для моделирования искусственных мыслительных систем, с другой – имеют не одно, а несколько решений. Поэтому мы считаем, что наша работа не завершена, и периодически возвращаемся к их рассмотрению. Иными словами, наша конструкция «дышит» и рекуррентно приближается к своему конечному варианту.

Литература

1. *Penrose R.* Shadows of the Mind. New Yrok ; Oxford : Oxford University Press, 2005. P. 457.

2. *Шамис А.С.* Пути моделирования мышления. М. : КомКнига, 2006. С. 457.

3. *Яхно В.Г.* Проблемы на пути конструирования симулятора живых систем // Труды конф. «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях–2011». Н. Новгород, 2011. С. 246–249.

4. *Шумский С.А.* Мозг и язык: гипотеза о строении «органа языка» // Труды конференции «Нейроинформатика-2012». М., 2012. Ч. 3. С. 224–231.

5. *Ежов А.А., Шумский С.А.* Нейрокомпьютинг и его применения. М. : МИФИ, 2008. С. 222.

6. *Карп В.П.* Интеллектуальный анализ данных в проблеме построения решающих правил классификации (на примере медицинской диагностики) // Новости искусственного интеллекта. 2006. № 2. С. 57.

7. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: УРСС, 2005. С. 240.

8. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация : Динамическая теория информации. М. : УРСС, 2004. С. 287.

9. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Рожило Я.А.* Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Ч. 1 : Цели и задачи мышления // Сложные системы. 2012. № 1. С. 25–41.

10. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Рожило Я.А.* Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Ч. 2 : Понятия «образ» и «символ» как инструменты моделирования процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Сложные системы. 2012. № 2. С. 25–41.

11. *Hopfield J.J.* Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // PNAS. 1982. V. 79. P. 2554.

12. *Grossberg S.* Studies of Mind and Brain. Boston ; Riedel, 1982 ; Idem. Nonlinear neural networks: principles, mechanisms, and architecture // Neural networks. 1988. V. 1. P. 17.

13. *Fitz Hugh R.* Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophys. J. 1961. V.1. P. 445.

14. *Nagumo J., Arimoto S., Yashizawa S.* An active pulse transmission line simulating nerve axon // Proc. IRE. 1962. V. 50. P. 2062.

15. *Nekorkin V.I., Velarde M.G.* Synergetic phenomena in active lattice. Springer-Verlag, 2002. 357 p.

16. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С.* О математических моделях нейропроцессоров // Настоящий сборник. Нижний Новгород, 2013. С. 192–195.

17. *Щепетов Д.С., Чернавский Д.С.* Анализ динамической модели процессора локализации образа // Настоящий сборник. Нижний Новгород, 2013. С. 205–208.

18. *Чернавский Д.С., Карп В.П., Родштат И.В., Никитин А.П., Чернавская Н.М.* Распознавание. Аутодиагностика. Мышление. М. : Радиотехника, 2004. С. 271.

19. *Rexed B.* The cytoarchitectonic organization of the spinal cord in the cat // J. Comparative Neurology. 1952. V. 96, № 3. P. 415–495.

Проблема преодоления неоднозначности: нужны ли язык и тело роботу? (К 60-й годовщине смерти Алана Тьюринга)

Т.В. Черниговская

Санкт-Петербургский государственный университет
Институт НИЦ «Курчатовский институт», Москва
tatiana.chernigovskaya@gmail.com

Человек живет в мире, где он постоянно сталкивается с неопределенной и многозначной информацией. Тем не менее он должен принимать решения, декодируя информацию однозначно и релевантно ситуации. Такая неопределенность и размытость информации касается всех модальностей восприятия, недаром идея размытых множеств уже давно завоевала популярность для описания таких феноменов (fuzzysets – Zadeh, 1965, 2002). Особенно очевидно это на примере человеческого вербального языка. Казалось бы, если основная функция языка – коммуникация, то неопределенность из такого кода должна была бы быть вытеснена максимально быстро. Однако мы видим совершенно противоположную картину. Возможно, стоит еще раз прислушаться к крупнейшему специалисту в области когнитивных наук Н. Хомскому, считающему, среди прочего, что язык как раз для коммуникации не так уж хорошо приспособлен, а сформировался главным образом для структурирования мышления, т. е. для процессов «внутренних»; коммуникативная функция в этом случае является как бы побочным продуктом. Вербальный язык обеспечивает номинацию ментальных репрезентаций сенсорного инпута и, таким образом, «объективизирует» индивидуальный опыт, обеспечивая описание мира и коммуникацию. Однако в работах по теории коммуникации давно обсуждаются так называемые коммуникативные ямы, провалы в понимании, весьма часто образующиеся несмотря на абсолютную, казалось бы, правильность построения сообщения (см., например, многочисленные работы H.H. Clark'a и H. Sacks'a). Таким образом, неопределенность и многозначность должна быть при коммуникации любого типа сведена к нулю, так чтобы в идеале каждое слово или конструкция имели одно значение. Точно также было бы разумно ожидать, что, эволюционируя, языки будут от неопределенности избавляться, но это противоречит фактам. К примеру, Т. Гибсон (Ted Gibson) считает, что неопределенность информации в вербальном языке – его преимущество и средство экономии, так как могут быть использованы одни и те же слова в разных ситуациях и с разными значениями, а ситуация разрешается с помощью контекста. В недавней работе (Piantadosi, Tilyand Gibson, 2012) приводятся корпусные исследования по нескольким языкам, и показано, что более короткие и более частотные слова как раз и являются самыми многозначными, что подтверждает идею экономности лексикона.

Есть и психологическое объяснение: считается, что говорящему когнитивно «выгоднее» передавать большее количество информации меньшими средствами, а слушающему тоже «выгоднее» включать все виды контекстов, чтобы декодировать компактное сообщение правильно, вместо того, чтобы анализировать композиционно и синтаксически сложные конструкции.

Особый интерес имеет исследование механизмов неоднозначности и неопределенности в произведениях искусства, где стоит совершенно противоположная задача – не уменьшить, а увеличить количество вариантов осмысления и прочтения. Эта область в рамках когнитивной науки разработана явно недостаточно.

Трудно спорить с тем, что интуитивные, метафорические, инологические когнитивные средства не менее мощны, чем классическая логика и ее следствия. Как удачно определено Д. Чернавским с соавторами, «при переходе от интуитивного к логическому происходит процесс переливания информации из одной тары в другую, менее емкую и более жесткую. Часть информации при этом теряется. Ценность потерянной информации зависит от целей, с которыми она могла бы использоваться. Согласно теореме Геделя, найдется ситуация, в которой окажется, что потерянная информация является ценной, и логический алгоритм откажет» (Чернавский и др., 2004, с. 194). Нельзя не согласиться, что логическое описание мира может становиться препятствием для получения новых знаний, не соотносящихся с привычными правилами. Конечно, логика развивалась, все более приближаясь в разных своих ипостасях к тому, что мы привыкли считать реальным миром, и наиболее эффективной на этом пути, конечно, оказывается нечеткая логика (Манин, 2008; Финн, 2009).

Значение исследования неопределенности имеет приложения для ряда наук – психофизиологии и сенсорной физиологии (восприятие звуковой, зрительной и особенно тактильной и ольфакторной информации), для когнитивной психологии практически для всех ее объектов, в частности для психологии восприятия зрительных и слуховых образов; для теории информации и исследования процессов обработки естественного языка человеком и при автоматическом анализе, для проблемы эффективности систем «человек – компьютер» (Hollan et al., 2000). Отдельный интерес вызывают вопросы моделирования алгоритмов

разрешения неопределенности в искусственных нейронных сетях. Прикладных приложений также множество – от психологической и лингвистической экспертизы до медицины и искусственного интеллекта.

Надежда на то, что когнитивные характеристики систем искусственного интеллекта приблизятся к уровню человеческих или даже превзойдут их, неоправданно растет. Вероятнее всего, это вызвано тем, что растет и скорость обработки информации, что, казалось бы, должно обеспечить когнитивный успех. Однако относительно мало обсуждается вопрос о том, какое именно общение с антропоморфными роботами мы будем считать адекватным, что мы от этого ждем? Это вызывает целый ряд вопросов, не только научных, но и экзистенциальных и этических.

Спор о том, что в природе человека появилось раньше – сложное мышление или язык и насколько они автономны, продолжается десятилетиями и не утихает. А это вызывает и более фундаментальные вопросы, среди которых не последний: «Что считать языком и какова его роль?» Является ли он существенным для взаимодействия человека с искусственными системами, и даже шире – с другими существами, обитающими в принципиально иных средах?

Язык многомерен, подвижен, динамичен и чрезвычайно разнообразен (более 6000 языков на планете), он принципиально не настроен на жесткость значений и формулировок, и это может быть объяснено только запросами самого когнитивного ментального пространства, если не сказать самого мира. Почему это важно осознавать не лингвистам, для которых язык – объект исследований? Потому что мозг говорит с нами не языком биоэлектрической активности и химических реакций, что весьма трудно свести к смыслам, а человеческим языком. Именно он показывает нам, как структурирован мир в сознании, как оттуда видится пространство и время, законы и явления природы, вкусы, запахи, звуки, температуры и текстуры, формы и абстракции.

Для того чтобы общение было вообще возможно, мы должны не только естественным или искусственным путем быть обучены общей системе знаков, но и разделять общее ментальное и физическое пространство. В философии это называется проблемой других сознаний и связывается, в частности, с проблемой qualia или восприятием от 1-го лица, т. е. с тем, что не измеряется децибелами или граммами, а описывается словами естественного языка – «кислое», «приятное», «теплое», «громкое» и т. д. Можно было бы возразить, что к этому можно подойти с позиций психофизиологии, отталкиваясь от порогов сенсорной чувствительности, но это не так, поскольку лишь дает параллельную словам qualia-шкалу (более подробно см.: Черниговская 2008, 2010, 2012).

Это ставит проблему телесности на одно из центральных мест при обсуждении возможностей эффективного взаимодействия с системами высокой степени сложности, неважно – живыми или силиконовыми. Конечно, если речь идет о роботах-помощниках, выполняющих простые команды, этим можно пренебречь, но если мы планируем создание сопоставимого с человеческим интеллекта, тогда стоит вспомнить, что наше мышление – это не только вычисления, и человека делает человеком гораздо более сложное когнитивное пространство, включающее искусство и духовную жизнь и основанное в большой мере на той телесности, в которой мы существуем.

Исследование поддержано грантом СПбГУ № 0.38.518.2013 «Когнитивные механизмы преодоления информационной многозначности».

Философские аспекты формирования квантовой физики в свете концепции личностного знания М. Полани

О.Е. Шнырева

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Иррациональная философия, в отличии от рациональной, которая стремится к некому систематическому учению о познании, носит не логико-методологический характер, а скорее «берет за образцы гуманитарные и художественные формы мышления, все богатство практик экзистенциально-антропологической традиции» [1]. Поэтому когда мы говорим о влиянии иррациональной философии на квантовую механику, мы пытаемся выявить связи не только между философским, по преимуществу гуманитарным, и естественно-научным знанием, мы пытаемся понять, возможен ли, используя терминологию Л.А. Микешиной, диалог различных когнитивных практик.

Повышенный интерес к квантовой механике со стороны не только «естественников», но и широкой интеллектуальной общественности связан с тем, что в рамках неклассической физики зарождается и кристаллизуется новый взгляд на само мышление и познание, его возможности и сферу применения. В связи с этим нам представляется необходимым изучать квантовую механику с точки зрения не только физических и математических предпосылок ее появления, но также мировоззренческих и социокультурных.

Принципиальная новизна квантовой механики по отношению к классической физике выражается в специфике многозначной квантовой логики, для которой не актуален запрет исключения третьего. Это в значительной мере отличается от конфронтационной логики мышления, привычно опирающейся на дихотомические парные категории. Истоки этой новой познавательной стратегии многомерного философского мышления следует искать не только в естествознании, которое по своей сути «консервативно», так как вынуждено защищаться от «псевдонаучных» теорий и сохранять идеал объективного, строго верифицированного знания. Во многом гуманитарная мысль XIX века с историей глубокого внутреннего кризиса и пересмотром сложившейся традиции философского знания породила этот новый тип мышления.

Большинство результатов, которые приносит естественно-научное и гуманитарное знание, появляются не только благодаря работе внутри своей научной области. На развитие большинства научных дисциплин оказывает влияние наличный социокультурный контекст и история, в которой концентрируется и смешивается опыт и естественно-научный и гуманитарный. Следует отметить, что нами не предпринимаются попытки доказать непосредственное воздействие умозрительных теорий на физику, а лишь видится необходимым проследить, каким образом естественно-научное сообщество оказывается готовым к восприятию нехарактерных для существующей парадигмы фактов и гипотез, полученных в результате эмпирических исследований. Именно поэтому нами предпринимаются попытки проанализировать процесс зарождения определенных идей в рамках философии и вхождения их в социокультурный контекст, становясь частью которого, они концентрируются в духовной жизни и расширяют познавательную и методологическую сферу, в том числе и естественных наук.

«Науки открывают новое знание, однако новое видение, которое при этом возникает, само не является этим знанием. Оно меньше, чем знание, ибо оно есть догадка; но оно и больше, чем знание, ибо оно есть предвидение вещей еще неизвестных, а быть может, и непостижимых в настоящее время. Наше видение общей природы вещей – это наша путеводная нить для интерпретации всего будущего опыта», – утверждает М. Полани в своей работе «Личностное знание» [2]. Терминологически фиксируемая ученым разница между «новым знанием» и «новым видением» частично отражает высказанную нами выше мысль о формировании цельного «горизонта мышления».

Необходимо отметить также, что интерес М. Полани к «общей природе вещей» отражает актуальную для XX столетия холистическую тенденцию. Известный российский ученый-физик С.Ю. Владимиров утверждает, что «главные физические теории, определявшие лицо физики XX века, свидетельствуют о том, что доминирующей была тенденция перехода от триалистической парадигмы, сформулированной еще Ньютоном, через дуалистические к монистической парадигме, опирающейся на единую обобщенную категорию, т. е. наблюдалось стремление от категорийного редукционизма к холизму» [3]. Именно холистический принцип, в основе которого лежит идея единой первоосновы и целостного миропонимания, позволяет увидеть внерациональные и иррациональные факторы, влияющие на науку.

К. Хюбнер в своей работе «Критика научного разума» анализирует дискуссию А. Эйнштейна и Н. Бора о том, является ли квантово-механическое описание мира полным. Философ приходит к выводу, что разногласия Н. Бора и А. Эйнштейна по данному вопросу показывают стремление двух физиков найти в научных исследованиях «подтверждение определенной онтологической структуры бытия, опираясь на определенные априорные установления» [4]. Действительно, после изучения интеллектуальной биографии двух великих физи-

ков причина их научных противоречий становится более ясной и прозрачной. М. Полани также отмечает, что различного рода «конфликты» в науке могут и не являться подлинно научными, а выглядят «как конфликты между конкурирующими способами научного видения или же между научными ценностями и вненаучными интересами, незаконно вмешивающимися в подлинный процесс научного исследования» [2].

Когда мы пытаемся проанализировать некое иррациональное и внерациональное знание, влияющие на науку, то неизбежно сталкиваемся со сложностью: зачастую это знание невозможно вербализовать, а тем более придать ему четкий формально-логический облик. Мы предполагаем, что происходит это главным образом потому, что такого рода знание предполагает более сложную взаимосвязь между субъектом и объектом, нежели это предусмотрено классическим естествознанием.

Следует также отметить, что когда мы говорим об иррациональных факторах в научном познании, мы не отрицаем возможность их рационального происхождения, мы говорим лишь о не рационализируемом способе влияния (т. е. о механизме) на тот или иной интеллектуальный процесс. Вероятно, поэтому М. Полани избегает формулировок типа «иррациональное» или «внерациональное» и предлагает концепцию неявного личностного знания, которое философ понимает как органическую составляющую личности, способ ее существования, «личностный коэффициент». Такое невербализованное знание существует в субъективной реальности в качестве «непосредственно данного», неотъемлемого от субъекта. М. Полани также называет данное знание «неизреченным интеллектом» и подчеркивает, что мы живем в этом знании как в одеянии из собственной кожи.

В конечном итоге мы предполагаем, что нельзя формализовать абсолютно все факторы, влияющие на процессы научного исследования, и нельзя раз и навсегда провести четкую грань, которая бы отделяла субъект познавательной деятельности от того, что в данный момент противостоит ему в качестве объекта [5]. В связи с этим возникает вопрос: возможно ли, чтобы формализованное описание когнитивных процессов считалось полным и исчерпывающим, не требующим некоторых дополнений?

Литература

1. *Микешина Л.А.* Философия науки. Современная эпистемология. Научное знание в динамике культуры. Методология научного исследования : учеб. пособие. М. : Прогресс-Традиция : МПСИ : Флинта, 2005. 31 с.

2. *Полани М.* Личностное знание. М. : Прогресс, 1985. С. 197–218.

3. *Владимиров Ю.С.* Метафизика. М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. 40 с.

4. *Хюбнер К.* Критика научного разума. М. : ИФ РАН, 1994. С. 7–80.

5. *Мэй Р.* Открытие Бытия. М. : Институт общегуманитарных исследований, 2004. 224 с.

Моделирование процесса обучения языку

С.А. Шумский

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
Serge.Shumsky@gmail.com

Введение

Цель данной работы – предложить биологически обоснованную модель обучения языку. Известно, что кора имеет двумерную ячеистую структуру [1]. Ее базовые элементы, *колонки* (диаметром около 300 мкм), в процессе обучения становятся детекторами определенных признаков, причем соседние детекторы реагируют на признаки, которые коррелируют между собой по времени. Запоминание и распознавание типичных корреляций во входных сигналах имеет большой смысл, так как они, скорее всего, имеют общую причину. Наша модель базируется на этой базовой способности коры.

Обработка информации в коре устроена иерархически. Во внешний мир «смотрит» лишь небольшая часть коры (*первичная кора*). Остальные ее участки анализируют комбинации уже распознанных сигналов [2]. Происходит последовательное распознавание различными участками коры все более сложных комбинаций коррелирующих друг с другом признаков.

Модель

Итак, в нашей модели кора представляет собой набор иерархически организованных самообучающихся модулей – *самоорганизующихся карт признаков*, анализирующих поступающие на них сигналы [3]. Конкретнее, мы полагаем, что модули коры, работающие с языком, «смотрят сами на себя», т. е. представляют собой *рекурсивные самоорганизующиеся карты признаков* [4–6].

Обучение языку. Морфология

Обучение языку начинается в «морфологическом модуле» коры, который отвечает за распознавание слов во входном потоке речи. Первые детекторы на морфологической карте распознают отдельные фонемы. За счет последовательного выявления все новых и новых корреляций происходит постепенное расширение этого исходного алфавита. Сначала на карте появляются детекторы наиболее частых коротких слогов, затем – сочетания уже известных слогов между собой, и так далее вплоть до самых крупных морфем и слов.

Обученная карта кодирует поступающие на ее вход слово ансамблем возбуждений, представляющих все его составные части – префиксы, корни, суффиксы и окончания.

Обучение языку. Синтаксис

Синтаксический модуль работает аналогичным образом, но не с фонемами, а с цепочками слов в предложениях. Он также запоминает характерные паттерны употребления слов (*синтагмы*) – сначала короткие словосочетания, а затем и более сложные фразы. В итоге мы понимаем, какие слова соотносятся с какими и как различные словарные группы в предложениях связаны друг с другом.

Синтаксический модуль, так же как морфологический, работает со своим входным алфавитом – признаками, которые определяют строение предложения. Это всем известные части речи, а также служебные слова и знаки препинания. Мы полагаем, что детекторы частей речи формируются в небольшом участке коры, представляющем собой «узкое горло» между морфологическим и синтаксическим модулем коры. Возможно, эту роль играет входной участок синтаксической коры.

Видимо, такой способ многоуровнего анализа – обработка сигналов в чередующихся больших и малых участках коры – применяется в мозгу повсеместно. В каждом таком узком горле формируется новый «алфавит», из которого следующий за ним относительно большой слой строит новый «словарь».

Обучение языку. Семантика

Синтаксический модуль коры запоминает и распознает типовые паттерны сочетаний *грамматических маркеров* – служебных слов и окончаний. Семантический модуль делает то же самое, но уже с *семантическими маркерами*, носителями смысловых значений слов – с их основами.

Основы выделяются на этапе морфологического анализа. Их намного больше, чем окончаний, и именно они занимают основной объем морфологической коры. Однако там они не несут никакого смысла. Смысловые значения слов задаются тем, в каких сочетаниях друг с другом они употребляются в языке. Синтаксический модуль с помощью служебных слов и окончаний помогает правильно определять контексты, в которых встречаются слова. Семантический модуль кластеризует эти контексты.

Машинное обучение языку

Описанная выше модель легла в основу программного комплекса «семантический процессор Голем» (рис. 1). Голем «учит язык» со скоростью около 2 тысяч слов в секунду, т. е. за сутки он усваивает около 4,5 года языкового опыта человека. В процессе обучения Голем формирует для себя карту смысловых значений слов (рис. 2) и начинает понимать, как они связаны друг с другом в конкретных предложениях (рис. 3).

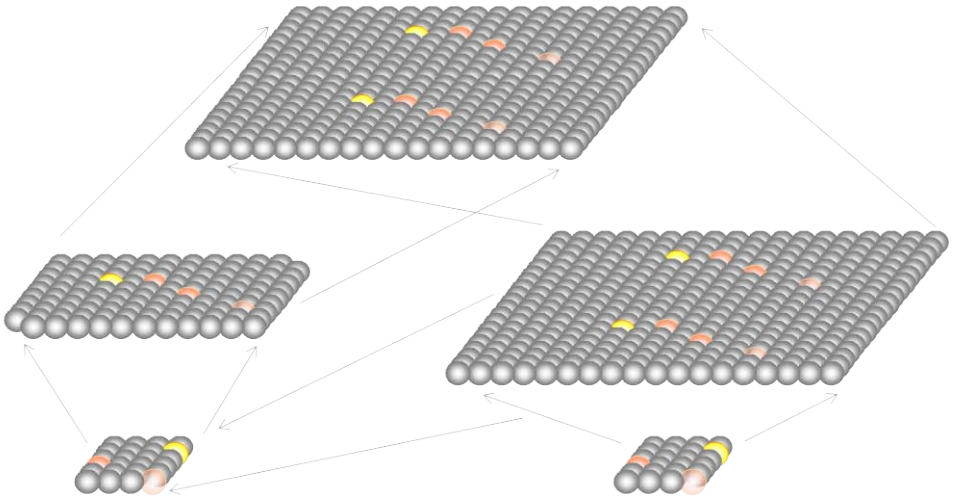


Рис. 1. Архитектура семантического процессора Голем. Морфологический модуль разбирает слова на более мелкие морфемы. Синтаксический модуль разбирает предложения на все более мелкие синтагмы, вплоть до отдельных слов. Семантический модуль находит распределение значений слов на семантической карте

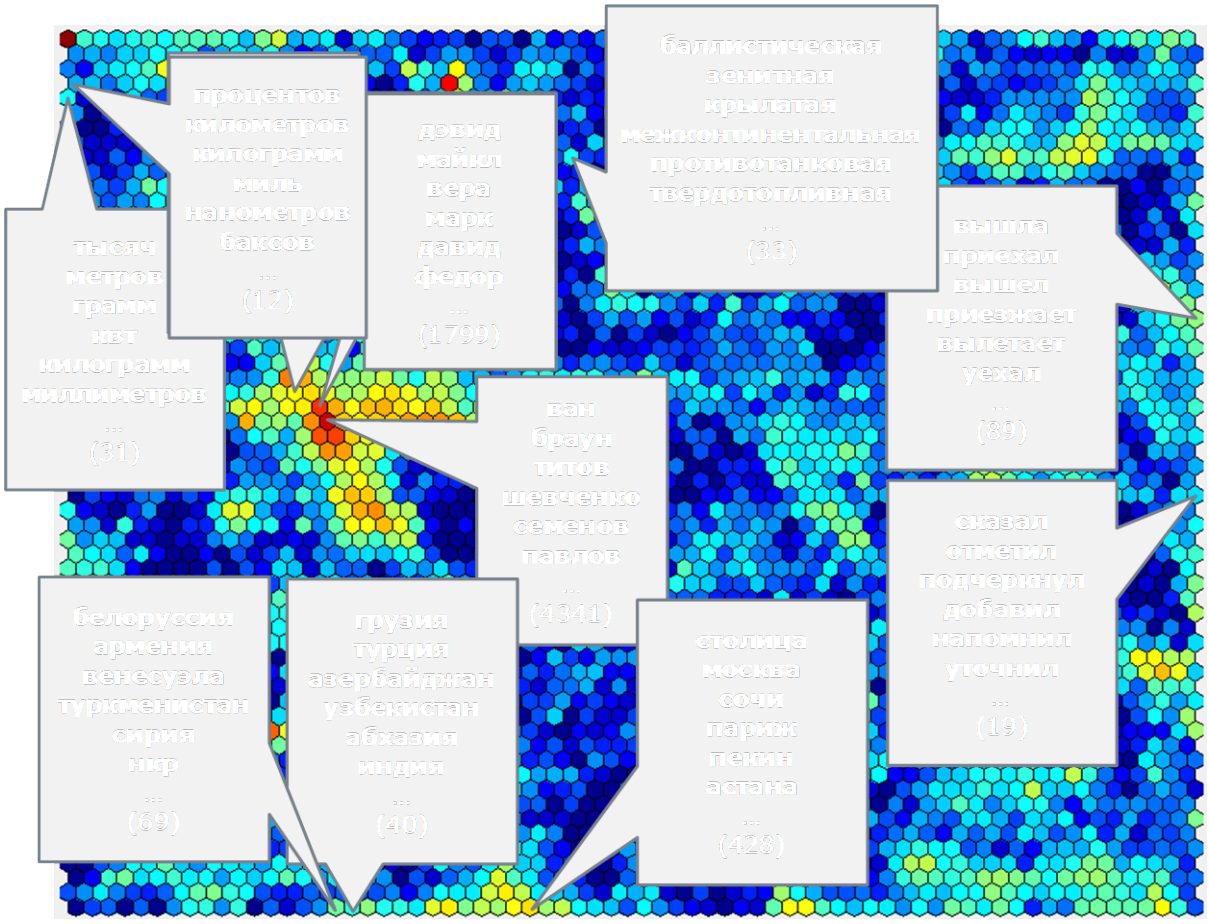


Рис. 2а. Содержание некоторых ячеек на семантической карте Голема. Близкие понятия находятся по соседству. Показаны первые несколько слов с максимальным представительством в данной ячейке.

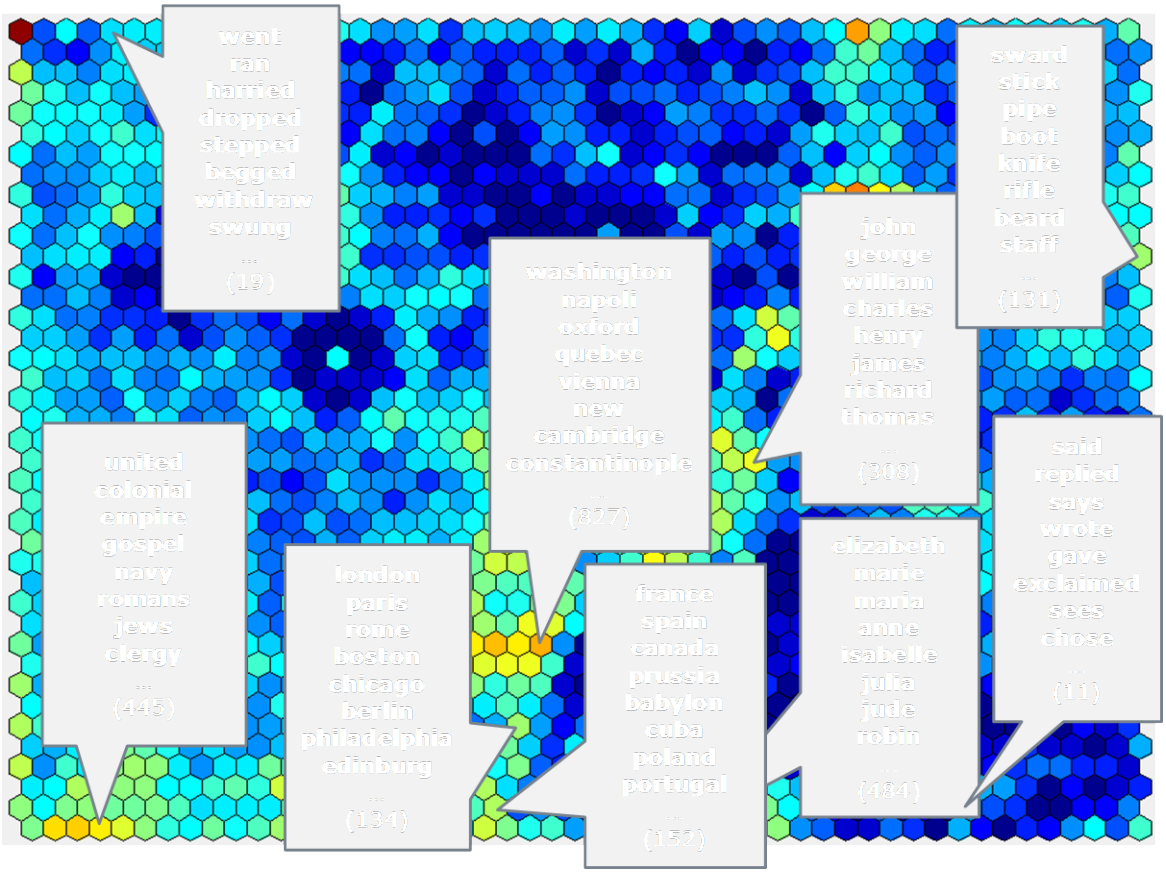


Рис. 2б. Семантическая карта, обученная на корпусе англоязычных текстов

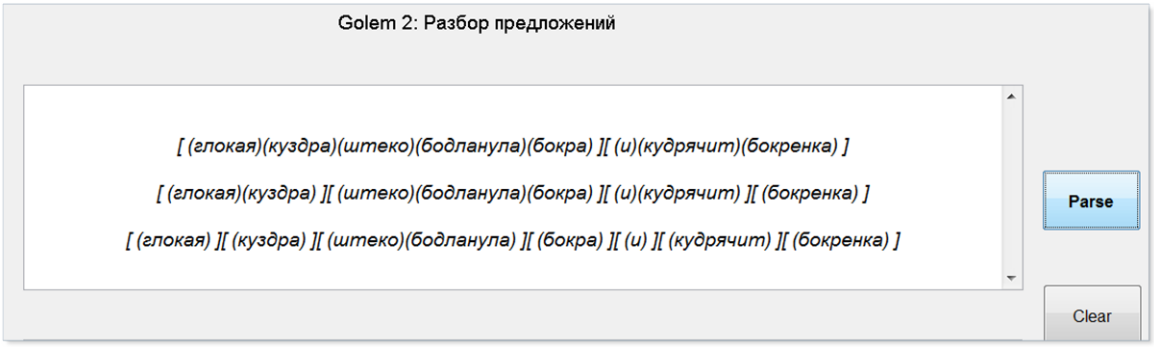


Рис. 3. Разбор предложений синтаксическим модулем Голема. Семантика слов при этом не важна

При этом он не использует никаких лингвистических баз данных, словарей или корпусов. Имея доступ к большим массивам «сырого» текста, он может выучить любой язык и освоить научный жаргон любой области знаний, наращивая свою компетенцию по мере обучения.

Литература

1. *Mountcastle V.* The columnar organization of neocortex // Brain. 1997. V. 120. P. 701–722.
2. *Лурия А.Р.* Высшие корковые функции человека. СПб. : Питер, 2008.
3. *Kohonen T.* Self-Organizing Maps. 3rd extended edition. N.Y. : Springer-Verlag, 2001.
4. *Voegtlin T.* Recursive Self-Organizing Maps // Neural Networks. 2002. V. 15, № 8/9. P. 979–992.
5. *Wiemer J.C.* The time-organized map algorithm: extending the self-organizing map to spatiotemporal signals // Neural Comput. 2003. V. 15, № 5. P. 1143–1171.
6. *Tino P., Farkas I., van Mourik J.* Dynamics and topographic organization of recursive self-organizing maps // Neural Comput. 2006. V. 18, № 10. P. 2529–2567.

Анализ динамической модели процессора локализации образа

Д.С. Щепетов, Д.С. Чернавский

Физический институт РАН, Москва
denis.shchepetov@gmail.com

Введение

Проблема моделирования процесса мышления средствами нейрокомпьютинга привлекает к себе интерес начиная с работ [1–4]. Возможности нейрокомпьютеров для решения конкретных прикладных задач были продемонстрированы неоднократно (см. [5] и ссылки там же), причем упор делался на надежность и эффективность этих решений. В последнее время становится все более ясным, что при моделировании именно человеческого мышления такой подход не вполне адекватен. Действительно, человек, сталкиваясь с различными жизненными ситуациями, должен научиться решать самые разные, в том числе некорректно поставленные, задачи, на первый план выходит проблема адаптационной способности. Поэтому человеческое мышление не детерминировано, часто непредсказуемо и ***всегда индивидуально***. Загадка индивидуальности мышления – один из основных «вызовов» (challenge) для моделирования процесса мышления.

Чрезвычайно важную роль в моделировании процесса мышления средствами нейрокомпьютинга играют понятия «образ» и «символ». Понятие «образ» относится к парадигме распределенной памяти и связано с процессором Хопфилда [2]. Считается, что один реальный предъявленный объект приводит к возбуждению многих $m >> 1$ нейронов. Это обеспечивает ***надежность*** и ***ассоциативность*** памяти. Надежность – потому, что не-активация одного или даже нескольких «нужных» нейронов компенсируется хопфилдовским механизмом «очищения» и не сказывается на качестве картинки. Ассоциативность – потому что похожие детали объектов возбуждают одни и те же нейроны, что воспроизводит объективное сходство реальных объектов.

Понятие «символ» относится к парадигме концептуальной памяти и связывается с именами Гроссберга [3] и Кохонена [4]. Здесь одному реальному объекту ставится в соответствие один возбужденный нейрон, символ данного образа. Фактически это представляет собой сжатие информации. Эта концепция важна для ***передачи*** информации (человеческая речь представляет собой поток символов), а также для ***управления памятью*** (человек не способен по своей воле активировать какой-то набор образных нейронов, но способен *вызвать* этот набор при помощи определенного слова, символа данного образа).

Проблема установления соответствия между образом и его символом, т. е. кодирования, ставилась и решалась в различных областях технической деятельности – радиофизике, коммуникациях и т. д. При этом главными качествами кода считаются его надежность (не-искажение) и эффективность (скорость и экономичность передачи информации). В том случае, когда речь заходит о моделировании процесса мышления человека, мы обязаны воспроизвести тот факт, что в живых системах соответствие образ – символ устанавливается само, в процессе самоорганизации системы. Прежде всего, мы обязаны воспроизвести *индивидуальность* процесса, затем уже оценивать другие характеристики.

В наших работах [6–8] эта проблема обсуждалась неоднократно, в разных аспектах. Целью данной работы является представить подробный параметрический анализ конкретного варианта процессора локализации образа.

Математическая модель

Процессор локализации образа представляет собой пластину, населенную n формальными динамическими нейронами, т. е. динамическими бистабильными элементами (см. [9]), способными переключать друг друга в активное или пассивное состояние в зависимости от условий обучения. Принцип работы следующий: при активации m нейронов ($m < n$) в результате их взаимодействия выживает только один из них, который и становится символом данного набора нейронов («образа») – как и в [4], «победитель получает все». Естественно предположить, что взаимодействие нейронов должно быть конкурентным (подавляющим).

В наших работах [6-8] рассматривалась следующая модель процессора локализации:

$$\frac{d G_k^{\sigma}(t)}{d} = \frac{1}{\tau_G}\left[-(\alpha_k - 1)\cdot G_k^{\sigma} + \alpha_k \cdot (G_k^{\sigma})^2 - (G_k^{\sigma})^3\right] - \sum_{l \neq k} \Gamma_{kl} \cdot G_k^{\sigma} G_l^{\sigma}, \quad (1)$$

где G_k^{σ} – переменные формальных динамических нейронов типа Гроссберга; $k = 1,\ldots, n$. Стационарные состояния нейронов в данном представлении: активное ($G = +1$) и пассивное ($G = 0$). Параметры представляют: τ_G – характерное время активации и α_k – порог активации (стационарные состояния существуют при $1 < \alpha_k < 2$ и равноправны при $\alpha_k = 1{,}5$). Отметим, что в данной модели взаимодействие конкурентное (что обеспечивается знаком «минус» перед последним членом) и нелинейное.

Подчеркнем, что символ, выбранный благодаря конкурентному взаимодействию, должен быть *запомнен.* Иными словами, в результате обучения связей Г при повторной активации того же набора нейронов должен побеждать тот же самый нейрон-символ. Этот эффект достигается путем *обучения связей* Г, которое можно представить следующим образом. До обучения все связи симметричны и равны: $\Gamma_{kl} = \Gamma_{lk} = \Gamma(0) = \Gamma_0$. В процессе обучения связи изменяются по закону

$$\frac{d\Gamma_{kl}(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau^{\Gamma}}\{G_k \cdot G_l(G_k - G_l)\}, \qquad (2)$$

где τ^{Γ} – временная характеристика обучения. Подчеркнем, что согласно (2) обучение (изменение связей) прекращается, когда один из взаимодействующих нейронов становится пассивен.

Отметим, что как во взаимодействии, так и в обучении принимают участие *только активные* нейроны. Это значит, что общее число нейронов на пластине роли не играет, важным является только число нейронов *m*, составляющих образ.

Исследования модели (1) показали, что в симметричном случае $\alpha_k = \alpha$ и $\Gamma_{lk} = \Gamma_{kl} = \Gamma(0) = \Gamma_0$, процесс выбора символа *неустойчив*. Это значит, что при активации образа из *m* нейронов $G_m(0) = 1$, $k = 1...m$, в результате нелинейного обучения связей вида (2) малейшее (случайное!) преимущество одного из них провоцирует его экспансию и подавление остальных.

Исследования модели проводились как аналитически, так и методом вычислительного эксперимента. Детальное аналитическое исследование возможно лишь в простейшем случае $m = 2$. Для этого случая строился фазовый портрет системы, анализировались возможные режимы поведения, проводился параметрический анализ и определение бифуркационных значений параметров Γ_0 и α.

В случае $m >> 2$ аналитические выводы могут быть только обобщены, а основным результатом является компьютерный эксперимент.

Анализ процесса формирования символа «образа» из двух нейронов

В этом случае модель (1) сводится к двум уравнениям для переменных G_1 и G_2; задача симметрична: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ и $\Gamma_{12} = \Gamma_{21} = \Gamma(0) = \Gamma_0$. В начальном состоянии {1, 1} оба нейрона активны; оно соответствует образу. В процессе формирования символа должен победить один из них, и конечным состоянием должно быть {1, 0} или {0, 1}.

Исследования проводились поэтапно. На первом этапе анализировался фазовый портрет системы *без учета обучения.*

Топология фазового портрета определяется ***поведением изоклин***. Вертикальные изоклины ($dG_1/dt = 0$) задаются условиями:

$$G_1 = 0; G_2 = -(\alpha - 1) + \alpha G_1 - G_1^2 - \Gamma_0 \cdot G_1. \qquad (3)$$

Изоклины горизонталей ($dG_2/dt = 0$) имеют вид

$$G_2 = 0 | G_1 = -(\alpha - 1) + \alpha G_2 - G_2^{\,2} - \Gamma_0 \cdot G_2. \qquad (4)$$

Точки пересечения изоклин соответствуют стационарным состояниям. При этом вырожденные изоклины $G_1 = 0$ и $G_2 = 0$ порождают тривиальные, или «чистые», стационары {1, 0}, {0, 1} и {0, 0} (на рис. 1 они помечены «1», «2», «3» соответственно), которые всегда являются устойчивыми узлами. Пересечения параболических изоклин порождают и другие стационары состояния, что приводит к нетривиальным эффектам. Из уравнений (3) и (4) следует, что симметричные состояния G^* равны:

$$G_1 = G_2 \equiv G_{+,-}{}^{*} = 1/2(\alpha - \Gamma_0) \pm \sqrt{(\alpha - \Gamma_0)^2/4 - (\alpha - 1)}, \qquad (5)$$

т. е. существуют в той области параметров, где дискриминант системы *D* не отрицателен:

$$D \equiv (\alpha - \Gamma_0)^2 - 4(\alpha - 1) \geq 0. \qquad (6)$$

Это условие накладывает довольно сильное ограничение на параметр Γ_0:

$$\Gamma_0 \leq \alpha - 2\sqrt{\alpha - 1}. \qquad (7)$$

Другая параметрическая бифуркация связана с устойчивостью симметричных состояний. Меньший стационар всегда является неустойчивым седлом; устойчивость большего стационара определяется числами Ляпунова:

$$\lambda_{\max} = -(\alpha - 1) + 2 \cdot (\alpha - \Gamma_0) \cdot G_+^* - 3 \cdot (G_+^*)^2; \qquad (8)$$

$$\lambda_{\min} = \lambda_{\max} - 2\Gamma_0 \cdot G_+^*. \qquad (9)$$

Меньшее из них $\lambda_{\min}$ всегда отрицательно, но $\lambda_{\max}$ может принимать различные значения.

На рис. 1 представлены три возможных варианта топологии фазового портрета. Рассмотрим их последовательно.

I. В области $\{D \leq 0\}$ параболические изоклины не пересекаются вообще. Состояния «1» и «2» являются чистыми, т. е. в них возбужден только один нейрон. Эти состояния представляют собой устойчивые узлы. Области притяжения их разделены сепаратрисой, которая в силу симметрии является биссектрисой.

Состояние «3» также является устойчивым узлом; в нем все нейроны пассивны.

Состояния «4» и «5» являются седлами, через них проходят сепаратрисы (на рисунке не показаны), отделяющие области притяжения состояний «1» и «2» от области притяжения состояния «3».

Начальное состояние $G_1 = G_2 = 1$ (образ) находится в области притяжения стационара «3». Изображающая точка из начального состояния быстро движется по биссектрисе к точке {0, 0} и остается в ней. Это означает, что предъявленный образ «гаснет» и символ не образуется.

Случай $D = 0$ является предельным: параболические изоклины не пересекаются, но касаются в точке $G^{**} = 1/2(\alpha - \Gamma_0)$. Эта точка представляет собой сложную бифуркацию «седло – узел» и не может обеспечить выбор символа.

II. В области параметров $\{D > 0, \lambda_{\max} < 0\}$ возникает сразу несколько новых стационаров, отмеченных на рис. 1, *б* цифрами «6»–«9». При этом состояния «8» и «9», в которых переменные G_1 и G_2 имеют промежуточные значения, являются седлами. Симметричное состояние «7», в котором $G_1 = G_2 = G^*_+$, определенное формулой (5), становится в этом случае *устойчивым узлом*, в область притяжение которого попадает начальное состояние {1, 1} (т. е. образ). Изображающая точка движется по сепаратрисе к состоянию «7» и там остается. Это означает, что символ не образуется, а все нейроны, составляющие образ, переходят в полувозбужденное («патологическое») состояние.

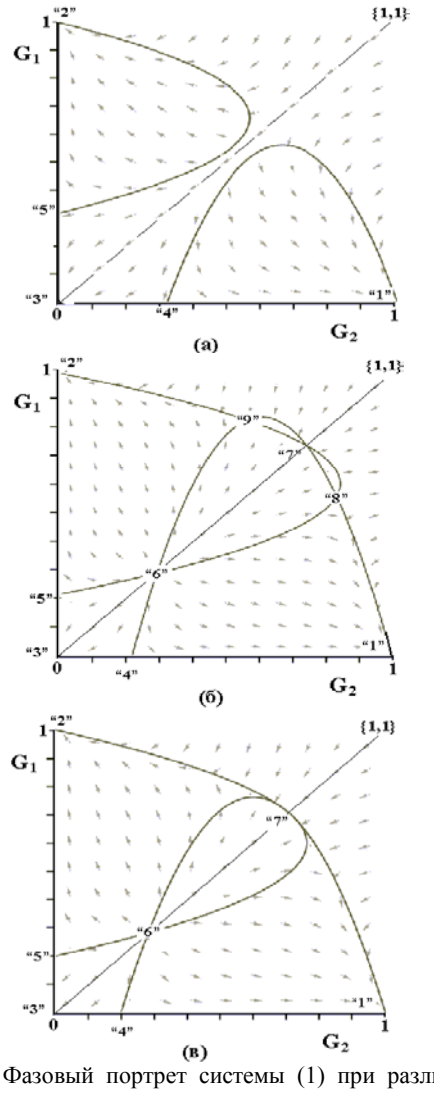


Рис. 1. Фазовый портрет системы (1) при различных соотношениях параметров (см. в тексте). Сплошные линии соответствуют изоклинам, стрелками указано направление движения изображающей точки

III. В довольно узкой области параметров $\{D > 0,\ \lambda_{max} > 0\}$, где D и λ_{max} определяются формулами (6) и (8) соответственно (рис. 1, *в*), фазовый портрет приобретает именно те свойства, которые необходимы для процесса выбора символа. Состояния «7», «8», «9» сливаются, и «7» становится *неустойчивым седлом*.

В таком режиме изображающая точка из начального состояния {1, 1} быстро движется по биссектрисе к значению $G_1 = G_2 = G^*_+$, где «застревает». Случайное отклонение приводит ее в область притяжения состояний «1» или «2». На рисунке 2 приведена зависимость $G_1(t)$ в процессе выбора символа-победителя при 10 предъявлениях образа (в силу симметрии задачи $G_2(t)$ ведет себя антисимметрично). В 50 % реализаций изображающая точка из начального положения {1, 1} уходит в стационар {0, 1} (что означает, что победил $G_2(t)$), как на рис. 2, *а*, а в других 50 % – в стационар {1, 0} (рис. 2, *б*).

Таким образом, мы заключаем, что режим, обеспечивающий формирование символа, в параметрическом пространстве занимает узкую область между режимами, при которых символ образоваться не может. Смысл этого результата в том, что при слабом взаимном подавлении (малых Γ_0) выживают все нейроны образа, хотя и в полувозбужденном состоянии. При слишком сильном взаимном подавлении гаснут вообще все нейроны. Только при определенном соотношении параметров Γ_0 и α выбор символа возможен.

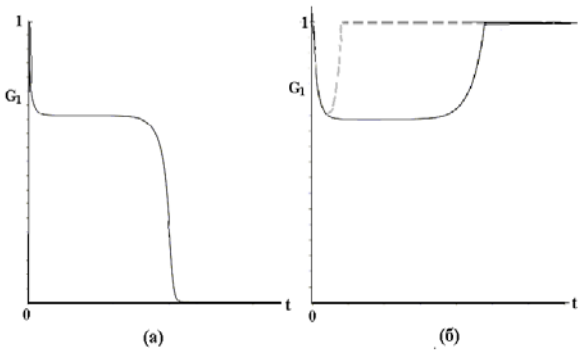


Рис. 2. Динамика переменной $G_1(t)$, полученная в результате компьютерного эксперимента по выбору символа-победителя: *а* – G_1 гаснет (побеждает G_2); б – G_1 побеждает (гаснет G_2). Серым пунктиром изображена та же зависимость, но после обучения связей с интенсивностью $\chi = 0{,}05$ (см. в тексте)

Ниже будет показано, что учет ***обучения связей* Γ** согласно формуле (2) значительно расширяет ту область параметров, где процесс формирования символа возможен. Само по себе обучение связей необходимо для того, чтобы выбранный символ *запомнился* и при следующем предъявлении того же образа активировался сразу (минуя стадию выбора). Заметим, что, согласно (2), обучение связей Γ антисимметрично, так что соблюдается условие $\Gamma_{12} + \Gamma_{21} = 2\Gamma_0$; иначе говоря, эти связи обучаются *не независимо*. Согласно анализу, проведенному выше, обучение следует рассматривать как процесс одновременный с выбором символа. Действительно, поскольку начальное состояние {1, 1} (образ) попадает в область притяжения седла «7», система быстро достигает этой точки и затем долгое время проводит в ее окрестности. Это дает нам возможность представить переменные в виде $G_1 = G^*_+ + \xi$, $G_2 = G^*_+ + \eta$ и $\Gamma = \Gamma_0 + \delta$ и исследовать малые отклонения ξ, η и δ от стационарных значений. Легко показать, что уравнения для отклонений имеют вид

$$\frac{d\xi}{dt} \propto (\lambda_{max} - \Gamma_0 G^*_+)\xi - \Gamma_0 G^*_+ \eta - (G^*_+)^2 \delta\,; \quad (10)$$

$$\frac{d\eta}{dt} \propto (\lambda_{max} - \Gamma_0 G^*_+)\eta - \Gamma_0 G^*_+ \xi + (G^*_+)^2 \delta\,; \quad (11)$$

$$\frac{d\delta}{dt} \propto \chi \cdot (-G^*_+ \xi + G^*_+ \eta), \quad (12)$$

где G^*_+ и λ_{max} заданы уравнениями (5) и (8) соответственно; параметр $\chi = \tau^G/\tau^\Gamma$ характеризует интенсивность обучения связей. Легко показать, что детерминант этой системы преобразуется к виду

$$\{-\lambda + (\lambda_{max} - 2\Gamma_0 G^*_+)\}\{-\lambda(-\lambda + \lambda_{max}) - 2\chi (G^*_+)^4\}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что одно из трех чисел Ляпунова $\lambda = \lambda_{max} - 2\Gamma_0 G^* = \lambda_{min}$ отрицательно и совпадает с таковым в отсутствие обучения (см. (9)). Два других определяются из условия

$$\lambda_{\pm} = 1/2 \cdot \lambda_{max} \pm 1/2 \cdot \sqrt{\lambda_{max}^2 + 8\chi(G^*)^4} \quad , \quad (14)$$

т. е. одно всегда отрицательно, второе же ***всегда положительно***. Иными словами, при одновременном выборе символа и обучении связей состояние G_+^* всюду в области его существования (7) является ***седлом***, т. е. неустойчиво**.**

Физический смысл этого прост: учет обучения одновременно с выбором символа включает положительную обратную связь малого отклонения изображающей точки от биссектрисы, что усугубляет неустойчивость и приводит к *быстрому* выбору аттрактора (устойчивого узла). На рисунке 2, *б* серым пунктиром представлена динамика поведения нейрона-победителя *после обучения*. Видно, что время активации выбранного символа существенно меньше, чем до обучения.

Формирование символа образа из m >> 1 нейронов

Эти выводы можно распространить и на случай образа из $m >> 1$ нейронов. Аналитические вычисления при этом затруднительны, но качественные выводы остаются в силе. Основной вывод заключается в том, что процессор, способный преобразовывать достаточно сложные образы $m >> 1$, должен обладать определенной «эластичностью», т. е. начальные значения силы связи Γ_0 должны быть малы. Нами был проведен компьютерный эксперимент для процессора, содержащего $n = 36$ нейронов.

На рисунке 3 показан образ, состоящий из $m = 12$ нейронов до обучения и нейрон-победитель, выбранный в результате обучения. До обучения все связи равны Γ_0 и на рисунке не указаны. После обучения указаны связи Γ_{ij} для $i < j$ (Γ_{ji} меняются антисимметрично): связи, ставшие более сильными, чем Γ_0, выделены черным цветом; ослабленные связи выделены белым.

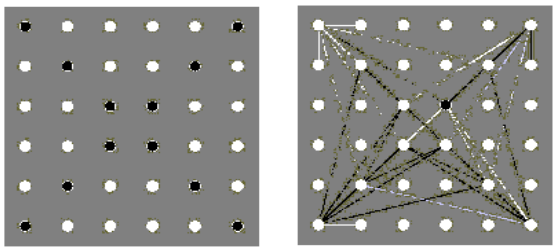


Рис. 3. Схема процессора с $n = 36$ нейронов, обрабатывающего образ из $m = 12$ активных нейронов (черные кружки) до (*а*) и после (*б*) обучения (см. в тексте)

Отметим, что время, необходимое для выбора нейрона-победителя, зависит, разумеется, от параметра χ, но кроме того растет с увеличением *сложности* образа, т. е. числа $m - 1$.

Заключение

Показано, что приведенная модель процессора локализации действительно может обеспечить процесс выбора и запоминания символа, но лишь в определенной области параметров.

Проведены подробные аналитические вычисления в простейшем случае процессора, состоящего из двух нейронов. Показано, что в том случае, когда выбор символа и обучение связей происходит одновременно, область параметров, обеспечивающая процесс формирования символа, существенно расширяется. Однако свойство «эластичности», т. е. достаточно малое согласно (7) изначальное подавляющее влияние нейронов друг на друга Γ_0, должно соблюдаться всегда.

Основным свойством представленной модели является тот факт, что процесс выбора символа *неустойчив*, и поэтому результат *случаен.* Именно эффект случайного выбора в искусственных системах может имитировать эффект *индивидуальности* живых систем.

Важно, что эти результаты получены на основе континуальной динамической модели, в которой можно детально проследить путь перехода нейрона из одного стационарного состояния в другое, учитывая поведение процессора в промежуточных состояниях $0 < G < 1$. В дискретных системах динамический анализ невозможен.

Литература

1. *McCulloch W.S., Pitts W.* A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity // Bulletin of Mathematical Biophysics. 1943. V. 5. P. 115.

2. *Hopfield J.J.* Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // PNAS. 1982. V. 79. P. 2554.

3. *Grossberg S.* Studies of Mind and Brain. Boston ; Riedel, 1982 ; Idem. Nonlinear neural networks: principles, mechanisms, and architecture // Neural networks. 1988. V. 1. P. 17.

4. *Kohonen T.* Self-organizing Maps. Heidelberg : Springer-Verlag, 2001. 655 p.

5. *Ежов А.А., Шумский С.А.* Нейрокомпьютинг и его применения. М. : МИФИ, 2008. С. 222.

6. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.* О роли понятий «образ» и «символ» в моделировании процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 5–20.

7. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Рожило Я.А.* Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Ч. II : Понятия «образ» и «символ» как инструменты моделирования процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Сложные системы. 2012. № 2. С. 47–67.

8. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Никитин А.П.* О возможных механизмах формирования символов в системе связанных нейропроцессоров // Труды конференции ICNC-2012. Ростов, 2012. С. 212–215.

9. *Чернавская О.Д. Чернавский Д.С.* О математических моделях нейропроцессоров // Настоящий сборник. Н. Новгород, 2013. С. 192–195.

Психофизиологические корреляты ментального усилия, сопровождающего понятийные преобразования, и преодоление информационной многозначности

О.В. Щербакова, И.А. Горбунов, И.В. Голованова

Санкт-Петербургский государственный университет
o.scherbakova@gmail.com

Вопрос о соотношении уровня физиологической активации субъекта с успешностью выполняемой им интеллектуальной задачи остается одним из наиболее актуальных в современной психофизиологии [1–3]. Изучение информационно-энергетических характеристик когнитивной деятельности осуществлялось на различном материале, однако одной из наиболее сложных форм интеллектуальной деятельности, требующей для своего успешного осуществления значительных энергетических ресурсов, принято считать понятийное мышление и концептуальные преобразования [4, 5].

Мы предполагали, что у испытуемых, более успешно выполняющих понятийные преобразования, т. е. имеющих более сформированные категориальные и концептуальные схемы, процесс совершения этой когнитивной деятельности будет сопровождаться менее выраженным ментальным усилием (в терминах показателей ЭЭГ и ЧСС).

В качестве задач, индуцирующих преобразования над понятиями, нами были использованы три различные по своему психологическому содержанию методики, для успешного выполнения каждой из которых испытуемому необходимо преодолеть многозначный информационный контекст:

1) задание «Обобщение трех слов» [5]: испытуемому последовательно предъявляются 10 триад слов, не имеющих очевидной семантической связи (например, «капкан», «забор», «пробка»); его задача – найти общий для них категориальный признак («емкость»). Выполнение этого задания задействует выполнение понятийных преобразований «вертикального» типа, т. е. движения «снизу вверх», от частных понятий к более общим;

2) задание «Метаграммы» [6]: испытуемому предъявляется 6 метаграмм – имеющих рифмованную форму загадок, в каждой из которых зашифровано не одно, а несколько слов, различающихся одной буквой. Задача испытуемого – найти все зашифрованные в метаграмме слова. Выполнение этого задания предполагает совершение «вертикальных» понятийных преобразований по принципу «сверху вниз» (определение частных понятий на основе их обобщенных описаний);

3) задание «Противоположные суждения» [7], разработанное нами на основе методики Т. Вуджека [8]: испытуемому предъявляется спорное в смысловом отношении суждение, касающееся одной из сторон повседневной жизни людей (например, «В Петербурге проживает *больше* шведов, чем в Москве»), после чего его просят подобрать 3 аргумента, объясняющих, почему это утверждение верно. Затем испытуемому предъявляется прямо противоположное по смыслу утверждение («В Петербурге проживает *меньше* шведов, чем в Москве»), к которому также надо подобрать 3 аргумента. Выполнение этого типа задания требует совершения «горизонтальных» понятийных преобразований, т. е. создания объяснительной ментальной конструкции, ее разрушения и создания на ее месте новой. Описанные 3 типа преобразований над понятиями требуют энергетических затрат и сопряжены с совершением ментального усилия.

Задания каждой из методик предъявлялись испытуемым (N = 34, 17–33 года, 23 женщины и 11 мужчин) в процессе регистрации ЭЭГ и ЧСС. В конце решения каждого из заданий испытуемый нажимал на кнопку ENTER, что останавливало процесс записи физиологических показателей, после чего вслух называл ответ. Ответы испытуемых оценивались количественно в баллах (от 0 до 2). Всего для каждого из 34 испытуемых получено 33 участка записи, в анализе ЭЭГ участвовали ее первые и последние 10 секунд. В указанных фрагментах ЭЭГ рассчитывались мощности в диапазонах основных ритмов. С помощью многомерного многофакторного дисперсионного анализа оценивалось влияние на мощности факторов:

1) «этап решения» (градации: начало решения и конец решения каждой задачи);

2) «успешность решения конкретной задачи» (градации: неправильное решение (0 баллов), правильное решение с незначительными отклонениями (1 балл), правильное решение (2 балла));

3) «общая успешность решения» во всех задачах одного типа (3 градации);

4) «тип задачи» (3 градации: «Обобщение трех слов», «Метаграммы», «Противоположные суждения»);

5) «частотный диапазон» (дельта-, тета-, альфа-, бета-, гамма-ритмы);

6) «отведение» (19 отведений).

Среди всех результатов необходимо выделить достоверное влияние факторов: «тип задачи», «этап решения», «общая успешность решения» и «успешность решения конкретной задачи».

На графике (рис. 1) отражено взаимодействие фактора «этап решения» с фактором «частотный диапазон». Как можно заметить, в начале решения высокочастотные ритмы мощнее, чем в конце, а низкочастотные – менее мощные. Такое измене-

ние соответствует снижению фрактальной размерности сигнала [9]. Соответственно, в процессе преодоления информационной многозначности и совершения ментального усилия фрактальная размерность ЭЭГ должна падать.

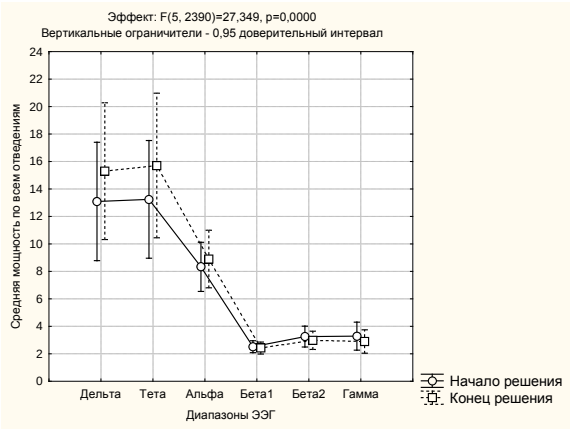


Рис. 1. Мощности в основных диапазонах ЭЭГ в начале и в конце решения задачи

Это можно интерпретировать следующим образом: в начале решения концептуальные схемы испытуемого, необходимые для успешного решения задачи, не соответствуют условию и не позволяют ему найти правильный ответ. При соотнесении предполагаемого результата решения с условиями задачи возникает ошибка, которая определяет активацию мозга (вызывает ментальное усилие). Это отражается в увеличении высокочастотных компонент ЭЭГ и снижении низкочастотных (т. е. усложнении сигнала). По мере нахождения решения концептуальные схемы корректируются в соответствии с условиями задачи, что позволяет приблизиться к нахождению верного ответа и что можно интерпретировать как модификацию матрицы связей межнейронных соединений. Вследствие такой модификации уменьшается ошибка при верификации результата условиями задачи, что отражается в упрощении сигнала, т. е. его синхронизации.

Также были получены значимые различия по показателям частоты сердечных сокращений между задачами с правильным и неправильным решением. На графике (рис. 2) представлены величины изменения RR-интервалов относительно фона при правильном и неправильном решении. Видно, что при правильном решении RR-интервал достоверно увеличивается относительно фона, т. е. сердце в среднем начинает биться реже, в то время как при неправильном решении оно бьется чаще.

Этот факт подтверждает гипотезу о том, что при правильном решении задачи в единицу времени затрачивается меньше энергии (потребляется меньше кислорода). Другими словами, продуктивная когнитивная деятельность обеспечивается меньшим ментальным усилием, чем непродуктивная.

В соответствии с этим возникает предположение о связи состояния организма, возникающего в момент предъявления условий задачи и связанного

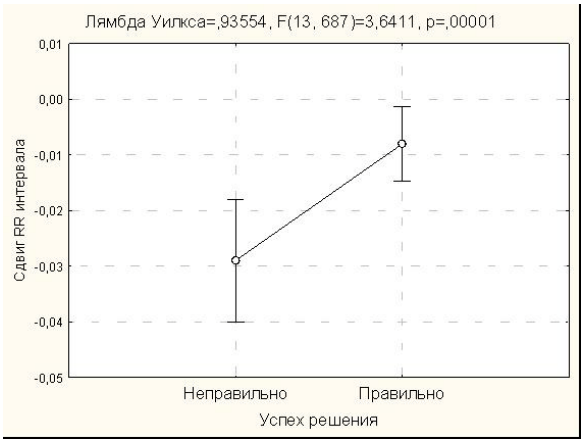


Рис. 2. Изменение RR-интервалов относительно фона при правильном и неправильном решении

с необходимостью преодолевать многозначный информационный контекст, с повышенной фрактальной размерностью ЭЭГ и повышением энергозатрат. Если это верно, то основную задачу мышления возможно понимать как снижение энергозатрат, которые возникают при реакции психики на многозначный информационной контекст.

Исследование выполнено при поддержке грантов из средств СПбГУ № 8.38.191.2011 «Информационно-энергетические аспекты когнитивной деятельности» и № 0.38.518.2013 «Когнитивные механизмы преодоления информационной многозначности».

Литература

1. *Чепа М.-Л.А.* Взаимосвязь информационных и энергетических характеристик познавательных процессов в деятельности человека : Автореф. дис. … канд. психол. наук. Киев, 1990.

2. *Jaušovec N.* Differences in Cognitive Processes Between Gifted, Intelligent, Creative, and Average Individuals While Solving Complex Problems: An EEG Study // Intelligence. 2000. V. 28 (3). P. 213–237.

3. *Neubauer A.C., Grabner R.H., Freudenthaler H.H., Beckmann J.F., Güthke J.* Intelligence and individual differences in becoming neurally efficient // Acta Psychologica. 2004. V. 116. P. 55–74.

4. *Веккер Л.М.* Психические процессы : в 3 т. Л. : Изд-во ЛГУ, 1976. Т. 2.

5. *Холодная М.А.* Психология понятийного мышления: От концептуальных структур к понятийным способностям. М. : Институт психологии РАН, 2012.

6. *Щербакова О.В.* О диагностическом потенциале метаграмм // Ананьевские чтения – 2010. Современные прикладные направления и проблемы психологии : материалы научной конференции, 19–21 октября 2010 г. Ч. 1 / отв. ред. Л.А. Цветкова. СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2010. С. 499–501.

7. *Щербакова О.В., Голованова И.В.* Исследовательские возможности методики «Противоположные суждения» // Материалы Международной науч.-практ. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Психология XXI века». СПб., 2013. [в печати].

8. *Вуджек Т.* Тренировка ума. СПб. : Питер, 1996.

9. *Вассерман Е.Л., Карташев Н.К., Полонников Р.И.* Фрактальная динамика электрической активности мозга. СПб. : Наука, 2004.

Математика и грамматики генетических структур живых систем

М.Я. Эйнгорин

СКИТ, Нижний Новгород
skit@vmk.unn.ru

В докладе рассматривается математический аппарат, как полагает автор, существовавший до построения жизни на Земле и явившийся основой синтеза генов и других структур живых систем. Рассматриваются отдельные математические вопросы, связанные с восстановлением природных грамматик синтеза генетических и других структур мРНК живого.

В докладе автор проводит линию от латинских квадратов, латинских гиперквадратов, их графического представления, многозначной логики, симметрии, систем счисления далее к построениям в живой природе. Математический аппарат позволяет расширить отдельные аспекты грамматик синтеза живых систем природы.

В докладе показано, что основы жизни – участки генов мРНК – строятся на строгих математических основах – грамматиках синтеза живого. Гены простейших живых организмов были созданы на базе тех же строгих математических законов, что и все последующие организмы. Хотя структуры генов совершенствовались. Для нас следствием этого является то знание, что не менее миллиарда лет назад, по космическим меркам небольшой срок, была создана математика, физика и химия, явившиеся основой синтеза живого на Земле. Далее были созданы грамматики. Структуры ДНК появились позднее, но и они вписались в те же математические и биохимические структуры. В результате исследований автором был открыт (как полагает автор) и сформулирован целый ряд новых законов живой природы. Показано, что симметрия – основа ее построений.

Автором показано, что сегодня все живые организмы вписываются в единую таблицу систематизации грамматик, что говорит о единой развивавшейся концепции создания живого на Земле, или искусственном происхождении всей живой природы планеты Земля. Грамматики незначительно отличаются друг от друга, но достаточно, чтобы синтез генов разных организмов был наиболее благоприятен и разнообразен. Показана вариабельность и многослойность генов, их более значительное содержание, чем мы полагали ранее. Показаны принципиально новые основы помехозащищенности генов.

Результаты работ автора говорят о том, что живая природа Земли, по крайней мере, вторична, а наше экологическое поведение должно вписываться в единую природную концепцию жизни на планете Земля. В противном случае мы, люди, можем оказаться на Земле лишними.

В докладе использован метод развития, разработанный автором через последовательное дискретное моделирование с наибольшим учетом свойств исходного моделируемого объекта.

Доклад и соответствующая монография [1] будет интересна и предназначена ученым-генетикам, ученым-биофизикам, работникам НИИ различных областей знаний, в том числе занимающимся проблемами нанотехнологий, преподавателям вузов, аспирантам, студентам-биологам, медикам, математикам, философам, специалистам, занимающимся генной инженерией и просто интересующимся проблемой происхождения жизни на планете Земля. Доклад, думаю, будет интересен специалистам, занимающимся религиями мира.

Литература

1. *Эйнгорин М.Я.* Математика и грамматики генетических структур живых систем ; монография. Н. Новгород : СКИТ, 2012. С. 496. ISBN 978-5-9904043-1-1.

Загадки работы мозга и модельные описания живых систем

В.Г. Яхно

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
yakhno@appl.sci-nnov.ru

Три стадии признания научной истины:
первая – «это абсурд»,
вторая – «в этом что-то есть»,
третья – «это общеизвестно».

Эрнест Резерфорд

Ощущение загадочности механизмов работы клеточных систем, а также мозга живых систем связано с большим набором уникальных способностей, эффективности выполнения операций, гибкости режимов поведения, которые в технических системах еще не достигнуты [1–14]. Эта ситуация заставляет «техногенно-ориентированных» исследователей строить математические модели, физические установки, а также симулирующие системы, в которых воспроизводятся основные элементы поведения живых объектов (см., например, [3–7]). Известно, что при разработке моделей живого, а следовательно, и методик управления ими существуют, как минимум, две группы, в общем-то, глобальных проблем, которые приходится решать уже сейчас: во-первых, это – пути доказательства технической реализации симуляторов живых систем; а во-вторых, это – условия и результаты использования в повседневной жизни уже созданных симуляторов.

Понимая несомненную и даже первостепенную важность второго аспекта, в данном сообщении основной акцент сделан на рассмотрении путей технической реализации симуляторов. При этом определяющую роль в модельном рассмотрении играют идеи и данные, определяющие архитектуру модельных распознающих систем. Если выбранные архитектуры модельных систем соответствуют реальности, то это позволяет реализовать основные наборы функциональных режимов, присущих живым системам. Математические модели, как инструментарий физических методов, позволяют описать основные закономерности сложных систем, динамику их поведения. Важно только, чтобы эти модели адекватно описывали изучаемый объект, т. е. например, минимизировали длину описания для всего набора рассматриваемых процессов [2–8].

В сообщении рассматриваются математические модели, соответствующие приведенной методике формализованного описания [5–7]. Модельные схемы для описания путей преобразования информационных сигналов в живых системах, в первую очередь, ориентированы на разработку «цифрового двойника человека». Обсуждаются определения «осознанного» и «бессознательного» восприятия сигналов, «интуитивного» принятия решений, рассматриваются режимы взаимного непонимания, «когнитивной слепоты», «когнитивных искажений», «когнитивного диссонанса» и ряд других особенностей при взаимном общении «живых» распознающих систем с разными «тунелями реальности». Приведены варианты классификации обозначенных проблем на основе наиболее очевидных решений, полученных с помощью иерархических распознающих систем с адаптивными функциями и осознанием входных сенсорных сигналов.

Чтобы снять покров загадочности с многообразных процессов СОЗНАНИЯ, в рассмотрении используется определение *элементарного процесса «осознания»* образа входного информационного сигнала как оптимизационного процесса (циклы настройки), связанного с повышением точности работы распознающих модулей (систем) и выбором адекватных алгоритмов кодирования, а также фильтрующих масок для этого образа.

Тогда, в противовес, *бессознательная обработка входного сигнала* соответствует случаям отсутствия циклов оптимизации, когда решение принимается без дополнительных проверок и используется наиболее оптимальный (точный) режим работы, который уже был найден и проверен в предыдущем опыте работы распознающих модулей.

Выделяется группа *интуитивных процессов,* основной признак которой связан с возможностью правильного принятия решения в условиях *полного отсутствия у системы предыдущего опыта решения задачи* (распознавания объекта). Система впервые решает задачу, и после некоторого промежутка времени отсутствия решения «неожиданно» находится новый алгоритм, позволяющий решить рассматриваемую задачу. В бессознательных режимах, наоборот, для обработки сигналов используются уже существующие в системе данные о распознаваемом объекте.

Описания сложных систем могут строиться на основе по-разному введенных определений и наборов «базисных функций», поэтому важно обратить внимание на согласование приведенных описаний с текстами, например, в справочнике по психологии. Так на с. 229 в [9] говорится, что можно «разграничить две формы неосознанной психической активности: 1) зависящей от уже запечатленной в мозгу информации (детерминация

прошлым) – *бессознательное*; 2) устремление на созидание того, чего никогда не было в личном и коллективном опыте (детерминация потребным будущим) – *надсознательное*», которое К.С. Станиславский обозначал термином «сверхсознание», а П.В. Симонов интерпретировал как механизм творческой *интуиции* [9].

Важно помнить, что процесс осознания (бессознательного или интуитивного восприятия) связан с конкретным образом и целевой функцией, в рамках которой работает распознающий модуль (система). А практические психологи и исследователи поведения людей выделяют не менее семи характерных уровней, каждый из которых состоит из многочисленных образов, режимов поведения для описания разнообразных сторон ПРИРОДЫ и изучаемых личностей [10–12]. Фактически, в зависимости от выбранных целей (контекстной ситуации), а также образа, на каждом из отмеченных уровней осуществляется «осознание» – оптимизационный выбор из возможных вариантов, подходящих для этого образа. Таким образом, та или иная конкретная форма обработки и принятия решений отражается или проявляется в одной из возможностей «спектра сознания». Сам «спектр сознания» формируется в процессе развития живого существа. В живой системе он отражает иерархию моделей описания как внешнего мира, так и состояний самого живого существа на основе его прошлого опыта. Поэтому «загадочность» этих процессов состоит только в неумении фиксации и регистрации тех программ обработки, которые мозг использует при анализе состояний изучаемой личности. В частности, одна из схем рассмотрения жизненных процессов и анализ возможных механизмов формирования "спектра сознания" приведены в работах К. Уилера [12–13]. Выделенные особенности архитектуры модельных систем позволяют постулировать утверждение: *определяющий признак живой системы заключается в возможности внутренней интерпретации распознающей системой входного сигнала и использовании этой интерпретации для оптимизации текущего решения на основе прошлого опыта.*

Сформированные к настоящему времени модели процессов активного распознавания, в том числе «мышления», позволяют рассмотреть множество процессов, которые без их использования представляются загадочными. Сейчас существует здоровый и оправданный оптимизм в возможностях создания технических версий некоторых уровней поведения живых систем – именно тех, которые формулируются разумными заказчиками. На место загадок о работе мозга приходит обширный набор инженерных задач о вариантах коллективной динамики агентов – людей с одинаковыми или разными объемами знаний, о механизмах понимания-непонимания между людьми, поиска этических и организационных форм существования людей в социумах и взаимодействия между социумами. Однако следует признать, что для полного копирования всех функций и уровней живого многообразия необходимы ресурсы, сравнимые с ресурсами ПРИРОДЫ – СОЗДАТЕЛЯ.

Анализ известных данных показывает, что режимы взаимного непонимания – это многопараметрический и многоуровневый процесс, который можно формализовать, но для этого должны соответствовать методики регистрации необходимых параметров в текущем функциональном состоянии. В обычной жизни люди выбирают стратегию «узкого» взаимодействия только по тем информационным каналам, в которых, как им кажется, они правильно интерпретируют сигналы. Считается вполне допустимым, что истинное богатство каждой индивидуальности есть бремя ответственности самой этой индивидуальности. Однако при проведении исследований необходим соответствующий инструментарий, например реализация некоторого варианта системы «Цифровой двойник человека». С ее помощью можно было бы проводить индивидуальную медицинскую диагностику человека, формировать описание его психологического портрета и его возможности в процессе взаимодействия с другими людьми. Такое устройство позволило бы «визуализировать» причины, механизмы взаимного непонимания людей и помогло бы росту уровня образования и представлений о каждом из нас и существенных чертах тех представлений, которые мы формируем о других индивидах в социуме.

Разработка таких устройств, несомненно, трудоемкая, нелегкая и в то же время интересная работа. Постараемся в азарте разработок не забывать известные слова Уинстона Черчилля: «Успех – это путь (способность) двигаться от одной неудачи к другой без потери энтузиазма».

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики» и гранта Министерства образования и науки Российской Федерации № 2012-1.1-12-000-1001-069, соглашение от 20 июля 2012 г. № 8055.

Литература

1. *Пенроуз Р.* Новый ум короля: о компьютерах, мышлении и законах физики : пер. с англ. / общ. ред. Б.О. Малышенко ; предисл. Г.Г. Малинецкого. Изд. 2-е, испр. М. : Едиториал УРСС, 2005. 400 с. (Синергетика: от прошлого к будущему).

2. *Ratushnyak A.S., Zapara T.A.* Principles of cellular-molecular mechanisms underlying neuron functions // J. Integr. Neurosci. 2009. V. 8(4). P. 453–469.

3. *Станкевич Л.А.* Искусственные когнитивные системы // Научная сессия МИФИ-2010. XII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2010» : лекции по нейроинформатике. М. : НИЯУ МИФИ, 2011. С. 106–160.

4. *Жданов А.А.* Автономный искусственный интеллект. М. : Бином. Лаборатория знаний, 2008. 359 с.

5. *Яхно В.Г., Полевая С.А., Парин С.Б.* Базовая архитектура системы, описывающей нейробиологические механизмы осознания сенсорных сигналов // Когнитивные исследования : Сборник научных трудов / под ред.

Ю.И. Александрова, В.Д. Соловьева. М. : Изд-во «Институт психологии РАН», 2010. Вып. 4. С. 273–301.

6. Подходы к моделированию мышления / под ред. В.Г. Редько, Москва : УРСС, 2013. [принято к печати].

7. *Парин С.Б., Яхно В.Г., Цверов А.В., Полевая С.А.* Психофизиологические и нейрохимические механизмы стресса и шока: эксперимент и модель // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2007. № 4. С. 190–196.

8. *Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Чернавская О.Д.* Схема конструкции из нейропроцессоров, способной реализовать основные функции мышления и научного творчества // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 21–35.

9. Психология : словарь / под общ. ред. А.В. Петровского, М.Г. Ярошевского. 2-е изд., испр. и доп. М. : Политиздат, 1990. 494 с.

10. *Ражниш Б.Ш. (Ошо).* Психология эзотерического. М. : Нирвана, 2004, 160 с.

11. *Свияш А.* Проект «Человечество»: Успех или неудача? Размышления о людях и их странном поведении. М. : АСТ : Астрель, 2006. 286 с.

12. *Маслоу А.* Мотивация и личность / пер. с англ. 3-е изд. СПб. : Питер, 2008. 352 с.

13. *Уилбер К.* Проект Атман : трансперсональный взгляд на человеческое развитие. М. : АСТ и др., 1999 ; 2004.

14. *Уилбер К.* Интегральная психология. Сознание, Дух, Психология, Терапия. М. : АСТ и др., 2004.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А
Акатьев Д.Ю. 148
Александров Ю.И. 5
Антонец В.А. 6

Б
Бахчина А.В. 9, 139
Беллюстин Н.С. 13
Болотова С.Ю. 104
Бондарь А.Т. 16
Борисов В.И. 162
Ботоева Н.К. 70
Бочаров А.В. 46
Бритвина Е.В. 20

В
Ватамова В.Н. 77
Ватамова С.Н. 40, 55
Витяев Е.Е. 22
Воловик М.Г. 25

Г
Гавриленко Т.В. 28, 55, 177
Газизова Э.М. 40
Гай В.Е. 31
Гараева Г.Р. 177
Голованова И.В. 209
Горбунов И.А. 104, 209
Григорьева В.Н. 139
Григорьева К.А. 139
Грубов В.В. 34, 37
Гузанова Е.В. 92

Д
Данильцева Г.М. 162
Даянова Д.Д. 40
Дегтярев Д.А. 77
Демарева В.А. 42
Дорожкин А.М. 44
Дорошева Е.А. 46
Дуденков А.А. 129
Дунин-Барковский В.Л. 48
Дьячук П.П. 51

Е
Елизарьева Н.В. 9
Еськов В.М. 55, 59

З
Запара Т.А. 62, 123
Золотухин В.В. 179
Зорина З.А. 66

К
Казаков В.В. 6
Казанцев В.Б. 93
Казимирова Е.Д. 152
Каратушина Д.И. 139
Карп В.П. 70, 188, 196
Клочков Б.Н. 74
Князев Г.Г. 46
Ковальчук А.В. 13, 25
Кожевников В.В. 9, 139
Козлова В.В. 77
Комиссаров Г.Г. 137
Корнеева Е.В. 37
Короновский А.А. 34, 37
Коротков А.Г. 79
Котикова Д.С. 9
Кречмер А.Э. 82
Крылов А.К. 86
Крылов В.В. 20
Кулаков С.В. 179, 183
Куприянова В.А. 89
Кушаев З.К. 92

Л
Лобов С.А. 93
Логинов Д.А. 51
Лосик Г.В. 97

М
Макаренко А.В. 99
Макаренко Н.Г. 103
Малахин И.А. 62
Мальков Ю.А. 20
Меклер А.А. 104
Моисеев С.В. 152

Н
Некрасова М.М. 9, 139
Никитин А.П. 188, 196
Никитин М.В. 82
Никонов Ю.В. 106
Нуйдель И.В. 109

О
Орлов А.В. 113
Осинов В.А. 115
Осипов Г.В. 79

П
Парин С.Б. 9, 139
Полевая С.А. 9, 25, 42, 139
Прокопчук Ю.А. 119
Проскура А.Л. 62, 123
Прыгунова Т.М. 162
Пряхин В.Ф. 126

Р
Радаева Т.М. 162
Радченко Г.С. 129
Ратушняк А.С. 62, 123
Редько В.Г. 131, 134
Рогожкин С.Б. 92
Романова Ю.В. 77
Рубцова Н.А. 137
Рунова Е.В. 139

С
Савостьянов А.Н. 46
Савченко А.В. 144
Савченко Л.В. 148
Садовников С.М. 152
Саяпина Ю.А. 70
Сидоренко Д.А. 177
Синеокова Т.Н. 154
Ситникова Е.Ю. 34, 37
Соколов М.Е. 109
Сопов М.С. 157
Сохова З.Б. 134
Станкевич Л.А. 159
Степанова Е.Ю. 162

Т
Тельных А.А. 165
Теплов В.А. 168
Ткаченко В.В. 97

У
Утробин В.А. 172

Ф
Файзуллина И.Ф. 177
Федотчев А.И. 16, 174
Филатов М.А. 40, 177
Филатова Д.Ю. 77
Филатова О.Е. 59

Х
Хадарцев А.А. 55, 59
Харыбина З.С. 183
Хетагурова Л.Г. 70
Храмов А.Е. 34
Храмов А.Е. 37

Ц
Цукерман В.Д. 179, 183
Цыганков В.Д. 187

Ч
Чепуркина К.В. 40
Чернавская О.Д. 188, 192, 196
Чернавский Д.С. 192, 196, 205
Черниговская Т.В. 198

Ш
Шадрин И.В. 51
Шапошников Д.Г. 115
Шемагина О.В. 165
Шерстюк Е.С. 59
Шишалов И.С. 9, 139
Шнырева О.Е. 200
Шубина Л.В. 16
Шумский С.А. 202

Щ
Щепетов Д.С. 196, 205
Щербакова О.В. 209

Э
Эйнгорин М.Я. 211

Я
Яхно В.Г. 212

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие ... 3

Александров Ю.И. От теории к факту ... 5

Антонец В.А., Казаков В.В. Что слышит ребенок в утробе матери? ... 6

Бахчина А.В., Парин С.Б., Шишалов И.С., Кожевников В.В., Некрасова М.М., Котикова Д.С., Елизарьева Н.В., Полевая С.А. Динамика ритма сердца в стрессогенных информационных контекстах ... 9

Беллюстин Н.С., Ковальчук А.В. Разработка адаптивного базового классификатора для когнитивной системы ... 13

Бондарь А.Т., Федотчев А.И., Шубина Л.В. Нелинейные взаимодействия ритмов в центральной нервной системе ... 16

Бритвина Е.В., Крылов В.В., Мальков Ю.А. Самоорганизация пространства поиска в больших системах с нечетким выбором ... 20

Витяев Е.Е. Логика работы мозга и причинность ... 22

Воловик М.Г., Полевая С.А., Ковальчук А.В. Принципы формализованного описания тепловизионных отображений: от уникального опыта к интеграции знаний ... 25

Гавриленко Т.В. Моделирование управления нейросетями мозга произвольными движениями человека – теппингом ... 28

Гай В.Е. Информационный подход к описанию звукового сигнала ... 31

Грубов В.В., Короновский А.А., Ситникова Е.Ю., Храмов А.Е. Метод эффективного удаления глазодвигательных артефактов на сигналах ЭЭГ с использованием процедуры ортогонализации Грама – Шмидта ... 34

Грубов В.В., Ситникова Е.Ю., Корнеева Е.В., Короновский А.А., Храмов А.Е. Анализ сигналов головного мозга с использованием метода эмпирических мод ... 37

Даянова Д.Д., Филатов М.А., Чепуркина К.В., Газизова Э.М., Ватамова С.Н. Ранняя диагностика эффектов воздействия слабых алкогольных напитков в хаотической динамике ... 40

Демарева В.А., Полевая С.А. Анализ связи между уровнем владения английским языком и параметрами звуколокализационной функции у учеников 3-го и 10-го класса ... 42

Дорожкин А.М. Проблемы и перспективы построения логики научного знания ... 44

Князев Г.Г., Дорошева Е.А., Савостьянов А.Н., Бочаров А.В. ЭЭГ корреляты спонтанной мыслительной активности и автобиографических воспоминаний ... 46

Дунин-Барковский В.Л. Понимание механизмов понимания: перспективы ближайшего будущего ... 48

Дьячук П.П., Шадрин И.В., Логинов Д.А. Компьютерный детектор ошибок как гомеостатический регулятор деятельности ... 51

Еськов В.М., Хадарцев А.А., Гавриленко Т.В., Ватамова С.Н. Вариабельность состояния параметров функциональных систем организма человека на примере непроизвольных и произвольных движений человека ... 55

Еськов В.М., Хадарцев А.А., Филатова О.Е., Шерстюк Е.С. Новые представления о стационарности и предсказуемости в когнитивных науках. Принципы работы мозга ... 59

Проскура А.Л., Запара Т.А., Малахин И.А., Ратушняк А.С. Молекулярные механизмы восприятия и первичной обработки сенсорных сигналов в нейронных системах ... 62

Зорина З.А. Новые подходы к изучению высших когнитивных способностей животных ... 66

Карп В.П., Саяпина Ю.А., Хетагурова Л.Г., Ботоева Н.К. Компьютерное моделирование динамики альтернативных комплексов космофизических показателей, определяющих «спокойные» и «тревожные» дни относительно возникновения сосудистых заболеваний (на примере случаев инсульта в конкретном географическом регионе) ... 70

Клочков Б.Н. Модели местной нервно-мышечной регуляции сосудистой системы ... 74

Козлова В.В., Романова Ю.В., Филатова Д.Ю., Ватамова В.Н., Дегтярев Д.А. Акустические воздействия и хаотическая динамика тремора 77

Коротков А.Г., Осипов Г.В. Последовательная активность в нейронном ансамбле с возбуждающими связями 79

Кречмер А.Э., Никитин М.В. Механизмы взаимной адаптации человека и сложных технических систем 82

Крылов А.К. Методы нелинейной динамики для оценки динамики вегетативных показателей и нейронной активности 86

Куприянова В.А. Творчество и измененные состояния сознания в контексте нелинейной динамики 89

Кушаев З.К., Гузанова Е.В., Рогожкин С.Б. Нарушения исполнительных функций у больных с аденомой гипофиза 92

Лобов С.А., Казанцев В.Б. Синхронизация пластичной нейронной сети в условиях интерфейса управления мобильным роботом 93

Лосик Г.В., Ткаченко В.В. Проблема создания «образного» Интернета 97

Макаренко А.В. Исследование межканальной синхронизации (симметричности) ЭЭГ в норме и при расстройствах шизофренического типа 99

Макаренко Н.Г. Как увидеть паттерны в облаке точек: персистентность как кредо экспериментатора 103

Меклер А.А., Горбунов И.А., Болотова С.Ю. Особенности динамики фрактальной размерности ЭЭГ при протекании эмоциональных процессов, относящихся к различным уровням психической иерархии у больных шизофренией, совершивших социально опасные поступки 104

Никонов Ю.В. Структура и динамика этанол-зависимой функциональной системы на ранних этапах становления ремиссии алкогольной зависимости в виде двудольной нейронной сети 106

Нуйдель И.В., Соколов М.Е. Примеры динамических процессов преобразования сенсорных сигналов в таламо-кортикальных сетях 109

Орлов А.В. Когнитивные состояния как психические явления 113

Осинов В.А., Шапошников Д.Г. Подход к детализации функции притяжения взгляда 115

Прокопчук Ю.А. Реализация принципа структурной когерентности в моделях когнитивной динамики 119

Проскура А.Л., Запара Т.А., Ратушняк А.С. Функциональные модели базового элемента когнитивности – нейрона 123

Пряхин В.Ф. О мировоззренческих аспектах естественнонаучных исследований когнитивных процессов 126

Радченко Г.С., Дуденков А.А. Влияние прослушивания музыки на динамику показателей вариабельности сердечного ритма 129

Редько В.Г. Моделирование когнитивной эволюции: заделы, первые результаты, перспективы 131

Редько В.Г., Сохова З.Б. Модель прозрачной рыночной экономики 134

Рубцова Н.А., Комиссаров Г.Г. Когнитивное моделирование на основе теории цепных процессов: инсайт 137

Рунова Е.В., Григорьева В.Н., Бахчина А.В., Парин С.Б., Шишалов И.С., Кожевников В.В., Некрасова М.М., Каратушина Д.И., Григорьева К.А., Полевая С.А. Вегетативные корреляты произвольных отображений эмоционального стресса 139

Савченко А.В. Об одном подходе к разработке автоматизированной системы дистанционного обучения произношению слов на основе вероятностной нейронной сети с проверкой однородности 144

Савченко Л.В., Акатьев Д.Ю. Выделение признаков речевого сигнала на основе теории приближенных множеств в методе нечеткого фонетического декодирования слов 148

Садовников С.М., Моисеев С.В., Казимирова Е.Д. Выражение функции полезности интеллектуального агента через саморегуляцию внутреннего состояния 152

Синеокова Т.Н. Невербальное поведение мужчин и женщин в эмоциогенных ситуациях 154

Сопов М.С. Влияние информационных характеристик словесного стимула на эффективность его опознания 157

Станкевич Л.А. Моделирование когнитивных функций навигационного поведения в интеллектуальной системе робота 159

Степанова Е.Ю., Радаева Т.М., Борисов В.И., Данильцева Г.М., Прыгунова Т.М. Значение когнитивных расстройств у детей школьного возраста с вегетативно-сосудистой дистонией 162

Тельных А.А., Шемагина О.В. Семантический анализ изображений 165

Теплов В.А. Сократительная система плазмодия *Physarum polycephalum* как аналог нервной системы на клеточном уровне 168

Утробин В.А. Физико-математические интерпретации системы зрительного восприятия на уровне врождённых механизмов 172

Федотчев А.И. Проблема осознания сенсорных сигналов и музыкальная обратная связь в лечебных процедурах ЭЭГ биоуправления 174

Филатов М.А., Гавриленко Т.В., Гараева Г.Р., Сидоренко Д.А., Файзуллина И.Ф. Сердечно-сосудистая система в условиях раздражения слухового анализатора 177

Цукерман В.Д., Кулаков С.В., Золотухин В.В. От фундаментальных нейронных представлений пространственного окружения к математическому моделированию и созданию электронного «мозга-трансформера» 179

Цукерман В.Д., Харыбина З.С., Кулаков С.В. Когнитивная фрагментация пространственного поведения нейронными микросхемами мозга 183

Цыганков В.Д. Расчет объема, величины и сложности сознания в нейрокомпьютере на базе математической теории QUALIA Джулио Тонони 187

Чернавская О.Д., Карп В.П., Никитин А.П. Вариант архитектуры мыслительной системы, основанный только на принципах динамической теории информации 188

Чернавская О.Д., Чернавский Д.С. О математических моделях нейропроцессоров 192

Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Щепетов Д.С., Чернавская О.Д. Естественно-конструктивистский подход к моделированию мышления: текущее состояние и проблемы 196

Черниговская Т.В. Проблема преодоления неоднозначности: нужны ли язык и тело роботу? (К 60-й годовщине смерти Алана Тьюринга) 198

Шнырева О.Е. Философские аспекты формирования квантовой физики в свете концепции личностного знания М. Полани 200

Шумский С.А. Моделирование процесса обучения языку 202

Щепетов Д.С., Чернавский Д.С. Анализ динамической модели процессора локализации образа 205

Щербакова О.В., Горбунов И.А., Голованова И.В. Психофизиологические корреляты ментального усилия, сопровождающего понятийные преобразования, и преодоление информационной многозначности 209

Эйнгорин М.Я. Математика и грамматики генетических структур живых систем 211

Яхно В.Г. Загадки работы мозга и модельные описания живых систем 212

Авторский указатель 215

ДЛЯ ЗАМЕТОК

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2013

ТРУДЫ III ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Оригинал-макет
подготовлен Редакционно-издательской группой ИПФ РАН

Бумага «DATA COPY»
Усл. печ. л. 27,5. Уч.-изд. л. 24,0.
Тираж 150 экз. Заказ № 66(2013)

Отпечатано на ризографе в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46