

Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований
Российская ассоциация нейроинформатики
Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет ВШЭ, Нижний Новгород
Сургутский государственный университет ХМАО-Югры

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2023

**ТРУДЫ
VIII ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2023

УДК 159.9.07(063)
ББК 88.25я431
Н49

Издано по решению редакционно-издательского совета
ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Ответственные редакторы
доктор физико-математических наук **В.А. Антонец**,
доктор биологических наук **С.Б. Парин**,
доктор физико-математических наук **В.Г. Яхно**

Редакционная коллегия
Н.Н. Кралина, И.В. Нуйдель, С.Б. Парин, С.А. Полевая

Н49 **Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2023**: труды VIII Всероссийской конференции / Федер. исслед. центр Ин-т приклад. физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН [и др.] ; отв. ред. В.А. Антонец, С.Б. Парин, В.Г. Яхно. – Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2023. – 192 с.

ISBN 978-5-8048-0121-3

Сборник научных трудов содержит доклады VIII Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2023» (Нижний Новгород, 21–25 августа 2023 г.). Конференция посвящена текущему состоянию, перспективам и новым возможностям экспериментальных исследований и формализованного описания когнитивных процессов, а также проблемам создания симуляторов живых систем.

В сборник включены доклады по следующим темам: механизмы и модели адаптивных и ментальных процессов в когнитивных системах; подходы и инструменты для исследования функциональной динамики живых и технических когнитивных систем; прикладные вопросы моделирования и регистрации когнитивных процессов.

УДК 159.9.07(063)
ББК 88.25я431

ISBN 978-5-8048-0121-3

© ИПФ РАН, 2023

Программный комитет конференции

Председатель:

Ушаков Вадим Леонидович (ИПИМ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)

Сопредседатели:

Александров Юрий Иосифович (ИП РАН, Москва)

Анохин Константин Владимирович (ИПИМ МГУ им. М.В. Ломоносова;
ИНФ им. П.К. Анохина, Москва)

Киреев Максим Владимирович (ИМЧ РАН, Санкт-Петербург)

Черниговская Татьяна Владимировна (ИКИ СПбГУ, Санкт-Петербург)

Шумский Сергей Александрович (ФИ РАН, Москва)

Члены программного комитета:

Абрашкин Анатолий Александрович (НИУ ВШЭ, ИПФ РАН, Н. Новгород)

Антонец Владимир Александрович (ННГУ; ИПФ РАН, Н. Новгород)

Григорьева Вера Наумовна (ПИМУ, Н. Новгород)

Горбань Александр Николаевич (Университет Лестера, Великобритания; ННГУ)

Дорожкин Александр Михайлович (ННГУ, Н. Новгород)

Дунин-Барковский Виталий Львович (НИИСИ РАН, Москва)

Жданов Александр Аркадьевич (ИТМиВТ РАН, Москва)

Еськов Валерий Матвеевич (СурГУ, Сургут)

Иваницкий Алексей Михайлович (ИВНДиНФ РАН, Москва)

Иванченко Михаил Васильевич (ННГУ, Н. Новгород)

Казанцев Виктор Борисович (ННГУ, Н. Новгород)

Крылов Андрей Константинович (ИП РАН, Москва)

Макаренко Николай Григорьевич (ГАО РАН, Санкт-Петербург)

Полевая Софья Александровна (ННГУ, Н. Новгород)

Парин Сергей Борисович (ННГУ, Н. Новгород)

Ратушняк Александр Савельевич (КТИ ВТ СО РАН, Новосибирск)

Редько Владимир Георгиевич (НИИСИ РАН, Москва)

Сергеев Александр Михайлович (Национальный центр физики и математики, Росатом)

Станкевич Лев Александрович (СПИИ РАН, Санкт-Петербург)

Сысоев Илья Вячеславович (Саратовский НИГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов)

Терехов Сергей Александрович (Москва)

Федотчев Александр Иванович (ИБК РАН, Пущино)

Чернавская Ольга Дмитриевна (ФИ РАН, Москва)

Яхно Владимир Григорьевич (ИПФ РАН, Н.Новгород)

Оргкомитет конференции:

Яхно Владимир Григорьевич (ИПФ РАН, Н. Новгород) – председатель

Парин Сергей Борисович (ННГУ, Н. Новгород) – зам. председателя

Нуйдель Ирина Владимировна (ИПФ РАН, Н. Новгород) – ученый секретарь

Антонец Владимир Александрович (ИПФ РАН, Н. Новгород)

Беллюстин Николай Сергеевич (ННГУ, Н. Новгород)

Воловик Михаил Григорьевич (ПИМУ, Н. Новгород)

Стасенко Сергей Викторович (ННГУ, Н. Новгород)

Ковальчук Андрей Викторович (ИПФ РАН, Н. Новгород)

Полевая Софья Александровна (ННГУ, Н. Новгород)

Шемагина Ольга Владимировна (ИПФ РАН, Н. Новгород)

Электронный адрес оргкомитета: nuidel@ipfran.ru

Web site конференции: <https://nd-cogsci.ipfran.ru/2023/index.html>

Дорогие друзья!

Конференция этого года посвящена памяти нашего земляка, выдающегося российского физиолога Александра Васильевича Зевеке (05.07.1923 – 20.05.2013), в связи со столетием со дня его рождения. Основываясь на результатах своих исследований функции механорецепторов кожного анализатора, он первым сформулировал представление о кодовой основе восприятия сенсорных сигналов и формирования чувственных ощущений. Это опровергало общепринятую, популярно-умозрительную «теорию» модальной специфичности рецепторов – болевых, тепловых, холодовых и др. В конце жизни Александр Васильевич успел увидеть многочисленные подтверждения своей правоты и получить мировое признание.

Как мы и договаривались при обсуждении результатов прошлой конференции, в этом году «**Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2023**» проходит с 21 по 25 августа. Когда работала прошлая конференция, Высшей аттестационной комиссией уже была введена новая группа специальностей: 5.12 – когнитивные науки. Поэтому оргкомитет посчитал полезным разделить принятые доклады на секции (симпозиумы) в соответствии с введенной классификацией областей когнитивных исследований: моделирование когнитивных процессов; междисциплинарные исследования когнитивных функций мозга; междисциплинарные исследования когнитивных процессов. В сборнике статьи расположены по алфавиту.

Мы надеемся, что такой подход поможет сгладить известную большинству участников коммуникационную проблему, вызванную как чрезвычайно широким многообразием научных подходов к решению когнитивной проблемы, так и особенностями восприятия информационных образов различными когнитивными системами. Мы надеемся, что это поможет участникам быть открытыми и терпимыми к возможно непривычному для себя способу мышления и научному языку своих коллег из смежных наук.

Хорошо известно, что основные особенности когнитивных систем связаны с большим разнообразием режимов их функционирования. Это объясняется тем, что сигналы о внешних воздействиях, а также внутренние сигналы управления обрабатываются с помощью трех классов алгоритмов, ориентированных на:

- 1) «образные» представления;
- 2) «логические, инженерно-ориентированные» описания, технические реализации;
- 3) широкий спектр конструкторов из совместного использования алгоритмов первого и второго классов.

При этом динамика преобразований, осуществляемая этими алгоритмами, в свою очередь, разделяется, например, на следующие группы восприятий:

- 1) бессознательные – автоматические реакции;
- 2) осознанные, настраивающие систему на конкретную обстановку и воздействие и, главное, использующие внутренние представления о входных сигналах;
- 3) интуитивные, в которых через запуск неспецифических реакций происходит обращение к внешнему окружению с надеждой на помощь в поиске путей разрешения непреодолимых для системы текущих проблем.

Важно отметить, что каждый из этих режимов, кроме наработанных в прошлом опыте правил (для которых методики регистрации уже сформированы), существует еще и скрытый, практически непознаваемый пласт механизмов, основанный на конкретном

опыте и особенностях развития конкретной изучаемой живой системы. Именно эти, часто непредсказуемые или непознаваемые для исследователя особенности скрытых механизмов могут переключать режимы функционирования живой системы и затруднять или делать невозможным статистический анализ собираемых данных.

Можно ли преодолеть эти трудности формализованного описания с помощью модельного подхода? В методологии физических исследований в каждом корпоративном сообществе принято договариваться об использовании общего набора аксиом и базовых моделей. Их применение проверяется на выбранной репрезентативной базе экспериментальных данных. При этом важно отметить, что в выборе и аксиом, и базовых моделей, и принимаемых во внимание экспериментальных данных присутствует существенная доля субъективных суждений. Однако в процессе множественных повторений методической процедуры формируются стереотипы, и исследователи часто постепенно забывают об этой доле субъективизма.

Успехи модельного подхода продемонстрированы, например, при использовании и нейронно-сетевых архитектур, и базовых моделей когнитивных систем, и при построении функции приспособленности, зависящей от множества конкурирующих стратегий в популяции взаимодействующих когнитивных элементов. Отличительные черты согласования этих моделей с экспериментальными данными выражены в следующем. В нейронно-сетевом подходе, особенно с участием методик глубокого обучения, приходится использовать очень большой объем экспериментальных данных, чтобы определить адекватные коэффициенты связи для элементов сети в заданной области функционирования. При этом, однако, достигается весьма высокое качество распознавания объектов, иногда превышающее возможности специалистов.

Для базовых моделей когнитивных систем (например, функциональной системы П. К. Анохина и её модификаций) выбранные схемы преобразуются в необходимые разработчику балансные уравнения. Из этих уравнений исследователь на основе своего опыта и соображений здравого смысла выбирает только те решения, которые по качественным или количественным характеристикам лучше всего соответствуют изучаемым динамическим режимам системы в эксперименте.

Таким образом, успешный результат достигается на основе опыта, а иногда и творческих возможностей самого исследователя. Поэтому малый объем изучаемых данных удается логично интерпретировать на основе ранее полученных знаний и данных, т. е. необходимый объем текущих данных дополняется теми, которые были получены в прошлом опыте исследователя. Сопутствующим достижением в таком подходе становится возможность формирования элементов научного языка: базовых моделей, спектров их решений в соответствующих областях параметров и других необходимых критериев. Именно такой язык позволяет выявлять области неоднозначных интерпретаций и снижает уровень возможного субъективизма в процессе формализовано-понятного общения между теми, кто этот язык освоил.

Существует также подход, связанный с построением функций приспособленности, зависящих от множества конкурирующих стратегий в популяции взаимодействующих когнитивных элементов. Этот подход расширяет возможности привлечения знаний и данных, полученных исследователем ранее для обоснования справедливости выводов даже при сравнении с данными лишь единичных экспериментов. Например, с его помощью удается формализовать использование правдоподобных гипотез о мотивациях или целях когнитивной системы. В результате процедура подгонки получаемых из базовых моделей решений к имеющимся экспериментальным данным становится более точной. Собеседник или читатель получает заодно и версию расширенного формализованного обоснования успешности выбранной конструкции модельного описания. Этот список успешных модельных подходов для формализованного анализа природных сложноорганизованных систем, наверняка может быть продолжен.

Складывается представление, что любые адекватные Природе аксиомы, схемы и режимы функционирования, которые исследователи рассматривают на формализованных моделях, могут существовать и в окружающей нас среде. Надо просто определить условия существования, поискать, и процесс может быть зарегистрирован.

Полагаем, что это краткое описание дает представление о разнообразии возможных режимов поведения, следующих из формализованных моделей когнитивных систем, и о том, как эти режимы можно прореживать при учете данных экспериментов и опыта исследователя. Конечно, все сразу описать невозможно, поэтому в работах выделяются лишь интересующие исследователя элементы (фактически – смысловые модели) общей иерархической системы.

Учитывая данные о преимущественном использовании образных, стереотипных представлений (более 90–95%) в различных языках людского общения, привлечем внимание лишь к некоторым из огромного множества известных «образов»-притч, которые оставили нам мудрые люди.

«Прежде чем осуждать кого-то, возьми его обувь и пройди его путь, попробуй его слезы, почувствуй его боли, наткнись на каждый камень, о который он споткнулся. И только после этого говори, что ты знаешь, как правильно жить...» (Далай-лама XIV)

«Пчела, вонзив стальное жало,
Не знает, что она пропала,
Так и глупцы, пуская яд,
Не понимают, что творят...» (Омар Хайям)

«Многие вещи нам непонятны не потому, что наши понятия слабы; но потому, что сии вещи не входят в круг наших понятий» (Козьма Прутков).

Конфликты мировоззренческих позиций в людских сообществах существовали, существуют и, по-видимому, будут существовать. Каждый исследователь делает свой мировоззренческий выбор. Либо он отрицает мнения, выходящие за его стереотипы, либо стремится вникнуть в смысл излагаемых результатов собеседника, даже если они противоречат устоявшемуся мнению воспринимающего когнитивного агента.

Нам ближе подход, в котором вместо ограничений избирается путь, открывающий новые горизонты исследований и возможности развития. От этого, конечно, возрастает доля субъективных суждений об устройстве Природы. Но для этого и организуются наши встречи, где можно открыто излагать и обсуждать разные взгляды и мнения.

Желаем пытливым исследователям успехов на пути осознания механизмов функционирования живых систем. Не будем забывать и о наблюдении Макса Планка: «Обычно новые научные истины побеждают не так, что их противников убеждают и те признают свою неправоту, а большей частью так, что противники эти постепенно вымирают, а подрастающее поколение усваивает истину сразу».

Безусловно, нестабильная обстановка последних лет влияет на возможности взаимодействия с зарубежными участниками. В любом случае наша задача – сохранить традицию встреч на гостеприимной Нижегородской земле!

С искренним уважением,
В.А. Антонец, С.Б. Парин, С.А. Полевая, В.Г. Яхно

Пространственно-временные характеристики диффузии молекул предопределили топологическую организацию многоклеточных животных и возникновение у них познавательной способности

В.А. Антонец

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
antonetsva@gmail.com

Введение

Изучение сознания и мышления считается в широком научном сообществе самой сложной современной проблемой. Конечно, прежде всего на этом настаивают психологи и философы [1]. При этом в евро-американской науке, по крайней мере весь 20-й век, по умолчанию считалось, что речь идет о сознании и мышлении человека. Работы этологов, изучавших познавательные способности животных, жестко критиковались, даже и с нарушением норм научного общения [2]. Это был род антропоцентричных когнитивных искажений, по-видимому, восходящих к религиозной картине мира.

И в то, и в нынешнее время, когда даже просто образованным людям было понятно эволюционное родство видов, для утверждения такой сингулярности человека нужно приводить сильные аргументы. Даже И.П. Павлов, которого часто интерпретируют как «рефлекциониста», соглашался с наличием ума у животных (см., например, [3]).

Сингулярное выделение человека на оси развития когнитивных (познавательных) способностей не является безобидной научной позицией. Оно отсекает значительный объем принимаемых во внимание теоретических и эмпирических данных (наблюдательных и экспериментальных), в частности тех, что получены при изучении животных. Это затрудняет формулирование продуктивных гипотез и разработку методов наблюдения и экспериментов, необходимых для развития когнитивной науки.

В предлагаемой работе сделана попытка определить на эволюционной оси время («стартовую точку») возникновения познавательной способности у многоклеточных животных. Задачу удастся решить путем рассмотрения влияния простых физических закономерностей диффузионного движения атомов и молекул на возникновение и формирование систем трофического обеспечения пластических и энергетических процессов у многоклеточных животных.

Постановка задачи

Физический масштаб проблемы, которую мы обсуждаем, в глобальном смысле невелик. Биомасса многоклеточных животных по углероду по разным оценкам [4] составляет не более 1% всей

биомассы Земли ($5,5 \cdot 10^{14}$ килограммов). При этом особо интересующие нас популяции человека, диких млекопитающих и птиц, обладающих развитой познавательной способностью, составляют около 0,01% биомассы Земли. С хорошей точностью вся биомасса Земли составляет 10^{-10} от ее массы, а та, что особо интересует нас, всего лишь порядка 10^{-14} .

Таким образом, речь идет о ничтожно малой доле атомов, тончайшим слоем распределенных около земной поверхности. Однако ее организация такова, что позволяет отразить в себе не только самое себя, но и наблюдаемую часть сложно структурированной Вселенной, которая по массе превышает биомассу, обладающую познавательной способностью, в 10^{42} раз. Поэтому вопрос о том, как и когда возникла эта рекурсия, т. е. отображение реального внешнего и внутреннего мира в виде информационной модели, будем считать главным.

Сформулированный вопрос сразу предполагает, что у разных видов эти модели разные. Это соответствует выдвинутой более ста лет назад Иксюлем [5] идее уникальности мира (Umwelt), в котором живут виды. Более того, вопрос автоматически подразумевает, что и у каждого индивида Umwelt уникален.

Основные предположения и принимаемые во внимание факты

Сделанные предположения не столько важны непосредственно для решения вопроса о причинах и времени возникновения познавательной способности у живых видов и связи этого с топологической организацией многоклеточных животных, сколько для обозначения позиции автора, с которой он ведет рассмотрение.

Первое из основных предположений заключается в том, что все без исключения процессы в живых объектах, включая обсуждаемые феномены сознания и мышления, не находятся в противоречии с фундаментальными физическими законами, так как реализованы на основе физического субстрата.

Второе основное предположение заключается в том, что Земля, на которой находится наблюдатель и наблюдаемая им жизнь, является открытой неравновесной системой, квазистационарным энергетическим источником которой является Солнце.

Конечно, Солнце входит в состав более крупных систем. По современным представлениям, оно возникло самоорганизационным образом около 4,5 миллиарда лет назад из газопылевого облака. Из-за произошедшего возмущения часть молекул этого облака под действием сил гравитации начала притягиваться друг к другу, и образовалось единое тело. Давление внутри сгустка молекул было таким большим, что начались термоядерные реакции, и Солнце начало светиться. Примерно через 100 миллионов лет из остатков этого облака, называемого протопланетным диском, под действием тех же сил гравитации образовались все планеты Солнечной системы. Но для целей настоящей работы влияние более дальних объектов, чем Солнце, не рассматривается.

Третье основное предположение заключается в том, что на Земле существуют каскады самоорганизационных процессов, порождаемые более мелкомасштабными неравновесными системами.

В частности, она находится под действием корпускулярного и волнового излучения Солнца, что может приводить к возникновению на ней пространственно-временных структур, например таких, которые определяют планетарную погоду. Кроме того, Земля обладает значительным внутренним источником энергии, выделяемой при распаде трансураниевых элементов ядра. Также на Земле от ее образования и поныне происходят сложные химические реакции, обуславливающие геохимическую эволюцию (самоорганизацию) тела Земли. Малая поверхностная часть этого тела благодаря работе бактерий эволюционно преобразована в почву – основу жизненного разнообразия.

Это предположение автоматически означает, что и все живое входит в состав тех или иных открытых систем и подвержено самоорганизации. Безусловно, и сама жизнь – явление самоорганизации, возникшее и эволюционирующее на фоне более длительных самоорганизационных процессов. В связи с этим требуется как минимум, уточнение вопроса о роли конкурентного отбора в происхождении и эволюции живых видов. Например, наиболее значительные изменения видового состава, происходившие при массовых вымираниях, заведомо являются следствиями сугубо физических самоорганизационных явлений.

Влияние параметров диффузионного транспорта на топологию многоклеточных животных

По современным представлениям, в эволюционном процессе многоклеточные возникали многократно. Многократно происходили и процессы возврата к одноклеточным формам. Промежуточные формы между одноклеточными и многоклеточными наблюдаются и в нынешнее время.

Исходной точкой проводимого анализа является факт, слабо зависящий от огромного потока новых данных о докембрийском периоде эволюции. Он состоит в том, что характерный размер

одноклеточных организмов составлял и до сих пор составляет 10–100 мкм. При этом диффузионная доставка веществ из окружающей, предположительно и обычно водной среды, через клеточную мембрану вполне эффективно поддерживает обменные процессы, пластически и энергетически обеспечивает существование и размножение одноклеточных.

Эволюция никак не изменила качественно механизм энергетического и пластического обеспечения клеток. У многоклеточного животного он остался диффузионным. Следовательно, выживающие клетки многоклеточных животных сгруппированы около развитых поверхностей с большой площадью, которые только и могут этот диффузионный обмен обеспечить.

Чтобы клетка была обеспечена кислородом и питательными веществами из окружающей среды, необходимо 3 типа таких поверхностей.

Функция первой из них – обеспечивать большую площадь контакта для газообмена. С дидактической целью до подбора удобного термина будем называть ее обобщенными легкими. Например, так будем называть даже и жабры рыб.

Функция второй – обеспечивать большую площадь контакта для всасывания питательных молекул. Будем пока называть ее обобщенным тонким кишечником. Как в него попадает химус или его аналог, обсудим ниже.

Функция третьей структуры – обеспечивать большую площадь контакта клеток многоклеточного животного как с обобщенными легкими, тонким кишечником, так и с самими обеспечиваемыми. Эту структуру будем называть обобщенным кровообращением.

Таким образом, топологическая структура многоклеточных всегда представляет собой континуум клеток, включающий в себя три фрактальных объекта, создающих развитые поверхности для диффузионного обмена. Эти объекты у разных многоклеточных животных могут развиваться из разных предшествующих структур. Эти структуры – неотъемлемая часть многоклеточных животных, их атрибут.

Однако диффузионная необходимость в обмене веществ, включая газообмен, порождает и два других атрибута, т. е. неотделимых свойства.

Один из них (пятый) – это система пищеварения. Многоклеточные животные не могут сохранять себя (выживать), ограничиваясь диффузионным всасыванием веществ из окружающей среды. Не являясь автотрофами, они могут быть только консументами, употребляющими в пищу сопоставимые с ними по величине фрагменты других многоклеточных растений и животных, или их целиком. Так как механизм жизнеобеспечения отдельных клеток диффузионный, эти фрагменты должны быть расщеплены до не слишком крупных молекул. Это делает неотъемлемым свойством (атрибутом) многоклеточных животных систему пищеварения, превращающую употребленную пищу в обобщенный химус.

Другой (шестой) атрибут многоклеточных животных – наличие направленной макроскопической подвижности в масштабах, существенно превышающих размер их тела, так как пища и потребитель должны приблизиться друг к другу или удалиться друг от друга.

Датировка возникновения познавательной способности у многоклеточных животных

Если локомоционная система не включает в свой состав систему навигации, то перемещения не могут быть направленными, а представляют собой беспорядочное движение с самопересекающейся траекторией. Даже такое высокоразвитое существо, как человек, движется именно таким образом, когда теряет ориентиры. Таким образом потребитель и пища могут приблизиться друг к другу только случайно, хотя вероятность приближения может быть достаточной для жизнеобеспечения.

Таким образом, направленное (не хаотическое) движение – это признак наличия у многоклеточного животного механизма навигации. Этот механизм, в свою очередь, предполагает наличие сенсоров той или иной физической природы, которые позволяют обнаружить в окружающем мире удаленную цель (пищу или угрозу). Он также предполагает способность животного использовать навигационную информацию для управления локомоциями. Это возможно только при наличии у него внутренней модели и сенсоров состояния собственного тела.

Всё вместе это и есть самостоятельный элемент познавательной способности, т. е. способности воспринять окружающий мир и использовать полученные сведения для осуществления необходимых для выживания действий. Любой факт направленного движения животного однозначно подтверждает наличие у него познавательной способности.

Заключение

Таким образом, время возникновения познавательной способности у многоклеточных животных может быть оценено двумя способами: а) по датировке первых палеонтологических следов направленного движения и б) по сопоставлению эволюционного возраста последнего общего предка способных и неспособных к упорядоченному движению родственных видов.

Можно определенно утверждать, что познавательная способность возникла не позднее 520 миллионов лет назад. Это соответствует возрасту *Diania castiformis*, которая, как выяснено, была способна двигаться направленно [6].

Благодарности

Автор благодарен А.К. Лабуцкому, С.В. Голубеву, В.Е. Турлапову и А.Ю. Журавлеву за поддержку и плодотворные обсуждения.

Работа частично профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН, проект № FFUF-2021-0014.

Литература

1. *Chalmers D.J.* Facing Up to the Problem of Consciousness // *J. of Consciousness Studies*, 1995. Vol. 2. P. 200–219.
2. *де Вааль Ф.* Достаточно ли мы умны, чтобы судить об уме животных. М. : Альпина нон фикшн, 2019. 404 с.
3. *Павлов И.П.* Об уме вообще, о русском уме в частности // *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. Т. 85, № 9–10.
4. *Bar-On Y.M., Phillips R., Milo R.* The biomass distribution on Earth // *PNAS*, 2018. Vol. 115, № 25. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.
5. *von Uexküll J.* *Umwelt und Innenwelt der Tiere*. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1909. 263 p.
6. *Liu J., Steiner M., Dunlop J. et al.* An armoured Cambrian lobopodian from China with arthropod-like appendages // *Nature*, 2011. Vol. 470. P. 526–530. <https://doi.org/10.1038/nature09704>.

О роли биологического и социального в становлении вербальной коммуникации

Н.Ш. Александрова

Общество «Языковой мост», Санкт-Петербург, nina.alexandrova@gmx.net

Одним из нерешенных вопросов современной науки является соотношение биологического и социального при становлении вербальной коммуникации. Вербальная коммуникация имеет особый статус среди проявлений функционирования языковой системы: только она является видоспецифической характеристикой человека, т. е. способность говорить обязательна для здорового человека, а любые ее нарушения связаны с болезнью. Другие проявления функционирования языковой системы – билингвизм естественный, билингвизм искусственный и письменная речь – не являются обязательной характеристикой здорового человека, они могут сформироваться лишь при определенных условиях или в результате обучения благодаря пластичности мозга [1]. Становление вербальной коммуникации в онтогенезе происходит как саморазвитие (созревание) [2, 3, 4], и в этом процессе основная роль должна принадлежать четким, отлаженным природой биологическим механизмам. Предполагаем, что социальная среда играет в этом процессе небольшую роль, если играет вообще.

Влияние социальной среды на *качество* языка у детей в дошкольном и школьном возрасте несомненно. Богатство лексики, правильность произношения, умение выразить мысли устно и письменно – все это связано с работой педагогов и с образовательным уровнем семьи. Но даже при этом, казалось бы бесспорном, утверждении необходимо сделать оговорку: способности здоровых людей при освоении родного языка заметно различаются. Здесь мы видим влияние биологического фактора – врожденной способности к овладению тем или иным навыком, в данном контексте – к овладению родной речью. Также возможна патология различных уровней речеслухового анализатора, затрудняющая или делающая невозможным освоение языка в любой, даже самой благоприятной социальной среде. Здоровье ребенка, т. е. биологический фактор, выступает основой, необходимой для постижения языка и его совершенствования в социальной среде. Если социальные факторы также играют заметную роль в данном процессе, то логично предположить у здоровых детей наличие нарушений языкового развития, обусловленных именно социальной средой. Статья посвящена поискам ответа на вопрос: могут ли нарушения языкового развития быть вызваны только социальной средой?

В среде, окружающей здорового младенца, могут возникнуть ситуации, тормозящие языковое развитие. Например, у глухонемой пары рождается здоровый ребенок, который, не слыша речи, заговорить не может. Другой пример: родители

психически нездоровы и не могут обеспечить ребенку надлежащий уход. С одной стороны, это проблемы социальной среды. Но можно ли описанные ситуации отнести к чисто социальным влияниям на младенца? Или здесь нарушаются условия, необходимые для выживания и нормального развития младенцев?

При обсуждении роли социума в становлении языка *условия выживания и развития младенцев* нужно отличать от чисто социальных влияний. К примеру, защита младенца от жары, холода и других неблагоприятных погодных воздействий – условие его выживания и развития. А в каком жилище будет находиться младенец, какая будет на нем одежда – социальная среда. Наличие достаточного количества полноценной пищи – условие выживания и развития, а чем ребенка будут учить есть (руками, ножом и вилкой, палочками) – социальная среда. Человек, который ухаживает за ребенком и является его собеседником – это условие выживания и развития, а образовательный уровень этого человека – социальная среда.

Условия биологического выживания и развития младенцев и беспомощных детенышей у млекопитающих следующие:

- пригодная для вида среда обитания (море для дельфина, лес для волка и т. п.),
- доступная пища,
- здоровые (адекватные по отношению к младенцу или детенышу) родители или опекуны (заметим, что здоровые родители у младенца – это обязательно говорящие родители),
- длительный и близкий контакт младенца и матери (опекуна) во время кормления.

Можно предположить, что длительность близкого контакта с собеседником, необходимая младенцу для его общего и речевого развития, равна длительности естественного кормления. То есть естественное кормление у млекопитающих – не только пища, но и гарантия близкого продолжительного контакта с детенышем. Родители (опекуны) в процессе кормления предоставляют лингвистическую информацию вместе с нелингвистической (жесты, мимика, звуки, действия и т. д.). Вероятно, это необходимо для раннего развития речи, а изолированного слухового входа (радио) для развития речи у младенца недостаточно.

Становление вербальной коммуникации – длительный природный процесс, поэтому контакт с собеседником, который обеспечивает доступность вербального материала, должен сохраняться длительное время.

Становление вербальной коммуникации (имплицитный языковой процесс) идет как саморазвитие (созревание) и для этого требуется опреде-

ленное количество речи вокруг ребенка, но увеличение этого количества речи не ведет к какому-то убыстрению или улучшению процесса становления языка. Предполагаем, что ребенок в период освоения языка берет из окружающей среды столько вербального материала, сколько может освоить.

Заключение

Среда, окружающая ребенка, включает в себя не только социальные условия, которые различаются у людей разных культур и эпох, но и условия, необходимые для биологического выживания и развития, которые едины для всех представителей вида *Homo sapiens* во все времена и, в целом, идентичны условиям выживания беспомощных детенышей млекопитающих в дикой природе.

Становление вербальной коммуникации у ребенка страдает:

– при патологии различных уровней слухоречевого анализатора (здоровье ребенка),

– при нарушении условий биологического выживания и развития младенцев.

Социальная среда обеспечивает качество языка. Неблагоприятные условия социальной среды (низкий образовательный и/или экономический уровень семьи) могут проявиться у здорового ребенка в дошкольный и школьный период как бедность словаря, неумение формулировать мысли и т. п., но бытовая вербальная коммуникация (видоспецифическая характеристика человека) при этом не страдает.

Литература

1. *Александрова Н.Ш.* Билингвизм и другие проявления функционирования языковой системы в свете пластичности мозга // Филологические науки. Научные доклады высшей школы. 2020. (DOI: 10.20339/PhS. 6–20.170–176).
2. *Lenneberg E.* Biologische Grundlagen der Sprache. Frankfurt: Suhrkamp, 1972.
3. *Пинкер С.* Язык как инстинкт. М., 2004.
4. *Ушакова Т.Н.* Речь : истоки и принципы развития. М., 2004.

Кризис сложности. Русский доклад Римскому клубу

А.И. Агеев¹, В.А. Громов², Н.М. Луковникова³,
С.Б. Переслегин¹, Е.Б. Переслегина¹, С.Ю. Шилов⁴

¹Международный научно-исследовательский институт проблем управления, Москва, ageev@mniipu.org

²Высшая школа экономики, Москва, stroller@rambler.ru

³Санкт-Петербургский политехнический университет

⁴Санкт-Петербургский государственный университет

В докладе приводятся результаты работы, представленной авторами на рассмотрение Римскому клубу. Механизм происходящих в мире изменений носит эволюционный, а не экологический характер. Иначе говоря, человечество столкнулось с кризисом развития, который имеет три независимые составляющие: кризис индустриального общества (фазовый кризис); кризис научного мышления (эпистемный кризис); кризис формата существования разума (социосистемный кризис). Доклад посвящен аспектам этого триединого кризиса и возможным путям его преодоления, не сводящимся к первичному упрощению, то есть отказу от достижений цивилизации, резкому сокращению численности населения и падению уровня жизни.

Первая часть доклада описывает основания глобального прогнозирования и, прежде всего, особенности прогностических техник, используемых авторами. Эта часть вписывает данный доклад в систему работ Римского клуба и ставит вопрос о пределах системного и мир-системного подходов. Дается краткое описание средового и сферного подходов, предлагаются инструменты для работы с любыми мыслимыми исследовательскими подходами (метадокси, операторы Громова).

Вторая часть включает в себя теорию цивилизационных фазовых кризисов и подробное описание текущего (постиндустриального) кризиса, включая прогнозы его длительности и характер изменений. Эта часть содержит описания военно-регионального, климатического, социального и научно-технологического аспектов кризиса. Делается вывод о развитии постиндустриального кризиса по «военной», а не по «климатической» или «эпидемиологической» модели.

Третья часть доклада посвящена описанию кризисного мира и в этом отношении представляет собой едва ли не единственный пример прогноза, где авторы пытаются заглянуть за кризис, за условную «точку сингулярности» и отыскать элементы нового и иного, которые будут реализованы в следующей фазе развития. Рассматривается тема когнитивных пределов и перспективы создания новой (постбэконовской, постнаучной) парадигмы познания. Кроме того, дается представление об изменении формата существования разума на Земле в связи с актуализацией сверхвызова искусственного интеллекта.

Римский клуб ввел в обиход понятие экологического кризиса. На сегодняшний день 22 из 57

его докладов, в том числе все пять сборочных работ, суммирующих тот или иной этап деятельности организации, прямо и непосредственно относятся к этой тематике. Общий вывод всех докладов по разным аспектам глобального экологического кризиса сводится к тому, что антропогенное воздействие привело к кризису природной среды, который можно охарактеризовать как шестое глобальное вымирание.

Мы считаем, что этот вывод в целом верен. Человек разумный действительно является причиной очередного циклического кризиса глобального биогеноценоза, однако механизм происходящих изменений, на наш взгляд, носит совершенно иной характер, нежели предполагали Д. Форрестер и Д. Медоуз. Речь идет об эволюционном, а не об экологическом кризисе.

На наш взгляд, проблемы, с которыми сталкивается сейчас человечество, значительно более серьезны и актуальны, нежели кризис окружающей среды, длительность которого составляет сотни тысяч лет, что намного больше времени жизни человеческих культур и даже цивилизаций.

Мы полагаем, что современные ключевые глобальные вызовы человечества имеют три независимых источника. Во-первых, это кризис индустриальной фазы развития. Предыдущие фазовые кризисы – мезолитический и античный – привели к серьезному демографическому спаду, экономическому и культурному коллапсу, длительным «темным векам». Социально-политическая и экономическая неустойчивость, открывшая текущий фазовый кризис, датируется 1967–1973 гг. В 2020 г., судя по всему, пройдена «точка невозврата». Фазовый кризис усугубляется также кризисом постиндустриального, технологического (пятого) уклада. Представляется, что попытка справиться с актуальными трудностями через развитие систем искусственного интеллекта, цифровизацию экономики, роботизацию производства будет иметь очень ограниченный успех, который, в свою очередь, приведет к ряду вторичных кризисов. Из них особое значение имеет экспансия систем искусственного интеллекта, которая может существенно переконфигурировать все пространство сверхвызовов.

Во-вторых, это кризис научного мышления, кризис бэконовской (эмпирической) рациональности. В настоящее время познание столкнулось с рядом когнитивных пределов, преодолеть которые без смены ключевой парадигмы, очевидно, не удастся. Это означает потерю уверенности в точ-

ности и объективности научных данных. Иными словами, становится небезопасным опираться на данные эмпирической науки при принятии ответственных политико-экономических решений. Все это в совокупности дает новый тип научного и гносеологического кризиса – кризис сложности. Частью кризиса научной рациональности является кризис мир-системного подхода, поэтому в данной работе он будет дополнен мир-сферным подходом.

В-третьих, наиболее серьезным и опасным является социосистемный кризис (кризис формата существования разума на Земле). Можно охарактеризовать социосистемный кризис как кризис общества, причем речь идет не о той или иной конкретной форме его организации (например, государственной), а о самой форме существования человеческой цивилизации как коллективной, иерархически организованной, управляемой базовой эмоцией страха. «Коронавирусный кризис» 2020–2021 гг. и порожденные им идеи «инклюзивного капитализма» следует рассматривать как раннюю манифестную форму социосистемного кризиса.

Становление бэконовской парадигмы познания утвердило в мировой науке субъект-объектный подход: субъект – это человек, ученый-исследователь, объект – то, что он исследует, чтобы далее его препарировать в интересах человека. Объект не имеет свободы воли, интенций поведения. По умолчанию, это предмет, вещь, хотя ученым приходилось иметь дело и с физическими полями, которые непредметны.

Абстрагируя предмет, ученый получал сначала простейшее понятие материальной точки, для которой возможно только поступательное движение. Позднее появилась необходимость в более сложной концепции абсолютно твердого тела (твердое тело может не только двигаться поступательно, но и вращаться), и в конце концов были созданы физические модели, учитывающие деформации. В любом случае субъект-объектный и предметный подходы механистичны, что предполагает детерминизм, законообразность, физику Ньютона – Эйнштейна.

В 1950-х годах Л. фон Бергаланфи на Западе, В. Свидерским в России и рядом других исследователей был создан системный подход. После этого все, с чем сталкивается исследователь, по умолчанию стало считаться «системой».

Система не имеет свободы воли, не порождает ценностей, но имеет цели: самосохранение, рост и развитие, самовоспроизведение. Поэтому система обладает поведением, и ее будущее является ограниченно предсказуемым. Система сценарно детерминистична: может быть описано некоторое ограниченное число сценариев ее развития. В рамках отдельного сценария вариативность отсутствует полностью, но выбор того или иного сценария – вариантен.

Системы, обладающие собственным поведением, незаконосообразны. Они, однако, начало-сообразны: опираются на начала термодинамики,

начала диалектики и т. д. Естественной теоретической средой системного анализа является пригожинская (неравновесная) термодинамика, ставшая основой семейства теорий: сложности, катастроф, синергетики и т. п.

Мир-системный подход, как версия системного подхода, описывает Мир / Землю / Человечество как систему. По существу, мир-системный подход – это масштабирование системного подхода до глобального уровня, распространение системного подхода на весь Земной Шар.

Данная методологическая основа позволила создать последовательные модели Мира («Мир-1», «Мир-2» и т. д.), описать процесс экономической и политической глобализации (в том числе увидеть процессы конвергенции социалистической и капиталистической версий развития и предсказать крушение советской сверхдержавы), проанализировать различные аспекты взаимодействия человека и биосферы, разработать концепцию экологического кризиса, включая климатический кризис в вариантах «ядерной зимы», «астероидной зимы» и «глобального потепления». Не будет преувеличением сказать, что современная медийная картина и основные шаблоны интернет-мировоззрения созданы мир-системным подходом.

Назовем упорядочением представление исследователя об исследуемом. Такое представление, конечно, зависит от поставленной задачи. Упорядочения различаются характерным поведением, способом и форматом описания, частотами существования / развития (ритмами). Выше рассмотрены два наиболее изученных упорядочения – объекты и системы. Кроме них, в настоящее время выделены и проанализированы также среды и сферы.

Среда может рассматриваться как система с бесконечным числом степеней свободы или, в другом языке, как система с бесконечным числом очень слабо проявленных противоречий. Ее возможные реализации – физическое поле, диссипативная (то есть рассеивающая энергию) вязкая среда, физическое твердое тело, в котором происходят процессы рождения / уничтожения квазичастиц.

Среды не рассматриваются в классических сценарных моделях. Дело в том, что среды предполагают бесконечное число сценариев, крайне мало отличающихся друг от друга, и соответственно бесконечное число неразличимых точек выбора.

Характерными средовыми процессами являются волновые, в том числе это могут быть квантовые и статистические процессы, сопровождающиеся колебаниями вероятностей. Поэтому управление средами – это управление вероятностями.

Сфера – это прежде всего сложный объект, сложность которого нельзя игнорировать в данной исследовательской задаче. Сферные объекты имеют неопределенное и переменное число степеней свободы. Они всегда характеризуются сложностью / глубиной, то есть имеют скрытую струк-

туру, недоступную для эмпирических наблюдений. Сферы можно идентифицировать по таким тегам, как «горизонт событий», «скрытое / непроявленное», «твисторные / вихревые процессы», «фазовые переходы», «хокинговское / сценарное излучение».

Мир-сферный подход можно понимать как рассмотрение глобальных упорядочений (Земля) и мега-упорядочений (например, Вселенная) в языке сферного подхода. Иными словами, мы принимаем, что эти объекты обладают сложностью, в том числе скрытой сложностью, развиваются через фазовые переходы, которые организуются через вихревые (твисторные) процессы. Мир-сферный подход понимает Землю как сферный объект, число Мейясу которого превышало единицу с самого начала геологической истории планеты. Эволюция Земли рассматривается как процесс взаимодействия сфер, составляющих Землю. На раннем этапе – это геосфера, гидросфера и атмосфера. Затем все большую роль в формировании рельефа Земли и ее различных организованностей начинает играть биосфера. Можно согласиться с В. Вернадским и П. Тейяром де Шарденом, что для современной и постсовременной Земли необходимо учитывать также и ноосферные процессы.

«Нечеловеческое, слишком нечеловеческое»: работа с системами сложнее тебя. Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта, социальных сетей, усложнение всей системы социальных взаимоотношений в современном обществе со всей жесткостью ставит вопрос о взаимодействии человека с системами более сложными, чем он сам. Отметим, что любовое столкновение человека с системами сложнее себя может привести к уничтожению человеческой личности и / или к ее растворению в более сложной системе, что равно талантливо – и каждый по-своему – показали С. Лем и А. Тарковский в своих «Солярисах».

Такая постановка вопроса обуславливает необходимость создания инструментов, позволяющих работать с системами сложнее себя. На первый взгляд такая постановка кажется неразрешимой; однако надежду здесь дает такой раздел математики, как математический анализ, который позволяет работать с актуальными и потенциальными бесконечностями. Отметим, что если в начале развития новоевропейской науки построение математических моделей было доступно лишь единицам и воспринималось как некое таинство, то теперь курс математического моделирования обрядово стоит в программах факультетов прикладной математики и компьютерных наук, и умение составлять хотя бы простейшие математические модели является квалификационным требованием для получения соответствующего диплома. Таинство превратилось в технологию. «Важно ведь именно превращение искусства в ремесло – в этом и состоит прогресс» (М. Осипов. «В родном краю»).

Если (по А. Тойнби) цивилизация есть ответ на вызов, то социосистема, как совокупность все-

возможных локальных культур и цивилизаций, представляет собой ответ на сверхвызов. Под сверхвызовом мы понимаем значимый вызов, обращенный к любому человеку и любой общности людей вплоть до человечества. Такой вызов не может быть проигнорирован, вследствие чего с ним, так или иначе, соотносятся все социосистемные процессы и организующие протекание этих процессов социальные институты и инфраструктуры. Их конкретные формы и проявления определяются цивилизационными и более низкими по рангу вызовами. Можно сказать, что организация любых обществ или сообществ порождена сверхвызовом. Сверхвызов нецикличесен (однократен), внеисторичен, обращен ко всему виду *Homo sapiens* или даже к нескольким разумным видам сразу. Сверхвызов не может быть снят – любая попытка его преодоления приводит к появлению того же сверхвызова в измененной форме.

До сих пор перед человечеством стоял единственный сверхвызов – сверхвызов смерти. Социосистема есть ответ на этот вызов (и именно поэтому она построена на эмоции страха). Сверхвызов смерти определяет, следовательно, характер протекания социосистемных процессов, в том числе процесса познания. Все социосистемные онтологии являются ответом на этот сверхвызов.

В настоящее время человечество сталкивается с новым сверхвызовом со стороны искусственного интеллекта. Локальными проявлениями этого сверхвызова являются безработица, депрофессионализация, потеря социального статуса многими специалистами, в том числе управленческим персоналом, военными и учеными, разрушение личной идентичности в цифровом мире.

Далее общество сталкивается, во-первых, с вызовом сильного мышления (по крайней мере, при оперировании BigData: искусственный интеллект (ИИ) даже современного уровня имеет ряд явных преимуществ перед человеческим мышлением), во-вторых, с вызовом иного, неантропоморфного мышления, в-третьих, с иррациональным, но социально значимым вызовом мертвого сознания.

Наиболее значимым проявлением сверхвызова ИИ является потеря монополии на разум и вместе с этим видовой идентификации *Homo sapiens sapiens*. Именно с этим обстоятельством связан кризис социосистемы: эта форма организации разума подразумевает уникальность разума и исключительность вида, обладающего разумом.

Понятно, что этот вызов обращен ко всем и значим для всех, нецикличесен, внеисторичен, то есть он действительно должен классифицироваться как сверхвызов. Сверхвызов смерти подвергает сомнению наше существование. Сверхвызов ИИ – смысл этого существования.

Проблема, однако, даже не в самом новом сверхвызове. Проблема в том, что возникло пространство сверхвызовов: если мы можем помыслить их как два (два независимых, а не превращенной формы одного-единственного), то мы можем помыслить их сколько угодно.

Что такое **метадокс**? Простейшие когнитивные конструкции (диалектические противоречия, триалектические балансы и т. д.) могут объединяться в (бесконечные) структуры, которые получили название метадоков. Важно подчеркнуть, что метадокс – это не столько сложная геометрическая структура, составленная из триалектических балансов и/или бинарных противоречий, сколько принцип, способ, позволяющий получать все новые и новые части метадокса, теоретически бесконечное число раз. Поскольку метадокс представляет собой бесконечную структуру, он обычно позволяет работать с потенциальной бесконечностью.

Формально метадоксом называется бесконечное рекурсивное обобщенное (диалектическое) противоречие. То есть все метадоксы, в принципе, бесконечны (хотя, конечно, мы всегда работаем с конечным числом рекурсивных порядков, чаще и вовсе с одним; однако остальные порядки предполагаются и имеют значение); для каждого метадокса известно правило, позволяющее по порядку N выстроить порядок $N+1$ (правило рекурсии); метадокс есть средство для работы с тем, что сложнее тебя. То есть метадокс – это запасенная сложность.

Метадокс включает в себя основное понятие, которое метадоксируется (собственно, это нулевой порядок метадокса); правило построения новых элементов метадокса и правило их формального наименования. Также в процессе наименования вершин мы связываем с каждой вершиной ее имя и/или описание, а также семантический спектр понятия, связанного с вершиной.

«Ковер Шилова». Простейшим среди метадоков является так называемый ковер Шилова. Центральной фигурой (элементалем) здесь также является баланс, обычно естественный (существование – бытие – богообщение). При этом каждая из вершин баланса порождает баланс с помощью конструкций типа характеристики базовой вершины с аспектом характеристики другой вершины (включая саму базовую), характеристика базовой вершины без аспекта характеристики другой вершины. Три полученных таким образом балансов, в свою очередь, используются в качестве базовых. Продолжая процесс рекуррентно до бесконечности, мы получаем метадокс «ковер Шилова». Название «ковер» он получил по аналогии с известным в теории фрактальных структур «ковром Серпинского».

Семантическое дифференцирование. Под дифференцированием одной вершины баланса по другой вершине баланса (и шире – под любым семантическим дифференцированием) мы понимаем конструкцию, определяемую как изменение характеристики первой вершины, инцидентной ребру, по изменению второй вершины, инцидентной ребру, взятое интегрально, по характеристике

третьей вершины (неинцидентной ребру). Такого рода характеристики мы будем называть производными (деривативными).

Семантическое дифференцирование может быть формализовано при рассмотрении семантических спектров (спектров В. Налимова) множества категорий, связанных с вершинами. Имеется вершина А и вершина В с их семантическими спектрами. Эти спектры связаны отношением противоречия. Изменим семантический спектр В, тогда (из-за связи через противоречие) изменится и семантический спектр А, тем самым поменяется именованное А. Разница этих именованных и есть семантическая производная А по В. Более того, мы можем продвинуться еще далее по пути формализации этого понятия: каждое из словопонятий, связанных с вершиной (или другим элементом метадокса) представляется в виде многомерного действительного вектора представления, эмбединга. Тогда с учетом совокупности таких векторов мы можем рассматривать их как индикаторную функцию, определенную на пространстве векторов соответствующей размерности и ненулевую на малой части пространства (окрестности эмбедингов рассматриваемого множества слов) – в этом смысле мы говорим об одно- и мультимодальных (одно- и многогорбых) спектрах. Тогда под производной следует понимать определенную тем или иным образом производную одной такой функции по другой.

«Глаз Шивы». Построение данного метадокса также начинается с центрального баланса (необязательно естественного). При этом с каждым ребром такого рода конструкции мы связываем производную одной вершины по другой. Составив баланс из производных категорий, получим возможность дифференцировать уже категории этого баланса, а продолжая процесс до бесконечности, получим метадокс типа глаз Шивы.

«Ковер Громова». Наиболее эффективным в практическом использовании оказалось сочетание ковра Шилова и глаза Шивы: на каждом шаге построения ковра Шилова для каждого вновь построенного баланса строится набор прямых, обратных и парадоксальных (последние – если возможно) производных (т. е. выполняется один шаг построения глаза Шивы).

Литература

1. *Кинг А.* Пусть кошка перевернется. М. : ИНЭС, 2012.
2. *Печчеи А.* Человеческие качества. М. : Прогресс, 1980.
3. *Гвишиани Д.М.* Методологические проблемы моделирования глобального развития. М. : ВНИИСИ, 1977.
4. *Гвишиани Д.М., Бунич П.Г.* Организация и управление. М. : МГТУ, 1998.

Новая хронология в Книге Бытия

А.А. Абрашкин

Высшая школа экономики, Нижний Новгород

Есть в Библии свидетельства, которые не дают покоя своей заведомой нереальностью. И одно из них – это фантастическое долголетие допотопных патриархов. Они живут более девяти веков или около того, и лишь Енох выбивается из общего списка. Бог отвел ему на земле 365 лет. Можно ли эти числа воспринимать всерьез?..

Другое хронологическое «откровение» Библии касается времени сотворения мира. Разные религиозные направления высчитывают его по-своему. Наша Православная церковь, опираясь на византийскую традицию, называет 5508 год до н. э. Другие церкви уточняют эту дату на свой лад, но в целом остаются примерно в тех же временных рамках. С естественнонаучной точки зрения все эти даты выглядят как очевидный казус. Археологические раскопки свидетельствуют о существовании в VI–V тыс. до н. э. уже развитых цивилизаций. Если же к этому вопросу подходить в более узком смысле и говорить о времени появлении первого человека или какого-либо его вида, то и здесь дату рождения Адама следует значительно удревить. В этом смысле историки уже давно махнули рукой на древнейшую библейскую хронологию. На их взгляд, она не имеет содержательного смысла. Богословы, правда, пытаются говорить здесь о трудных вопросах Библии, но это не более чем уловка. Налицо явное несоответствие библейских датировок реальному ходу исторических событий.

Можно, конечно же, не задумываться на этот счет и списать все на богатую фантазию создателей Книги Бытия. Но мы предлагаем взглянуть на данную ситуацию по-другому. Исследователи Библии неизменно напоминают нам о священности каждой буквы в ней. Подобно всякому эпическому сочинению, все в ней имеет и смысл, и значение. И вереница чисел в Книге Бытия – не исключение. Она тоже содержит какую-то важную информацию, но при ее передаче произошел «сбой». Древние документы редактировались, и внесенные в них правки не всегда соответствовали их изначальному смыслу. Не произошло ли то же самое и с библейскими фрагментами, посвященными хронологии патриархов и их ближайших потомков? Давайте проанализируем принцип ее составления, вникнем в ее внутреннюю структуру и попробуем определить, а не является ли она исправленным вариантом более древнего текста? Подчеркнем еще раз, что у нас нет никакого желания переиначить содержательную часть Священного Писания, его канонические установки. Речь идет лишь о гипотетической возможности разрешить одну из туиковых проблем в истолковании сведений, содержащихся в Книге Книг.

Родословные патриархов составлены единообразно. Библейский автор, начиная с Адама, придерживается все время одного и того же порядка. Назвав имя патриарха, он указывает на его возраст в момент рождения у него следующего члена генеалогии, затем определяет количество лет остальной жизни этого патриарха, подводит общий итог его долголетию и заканчивает все это упоминанием о его смерти. Приведем для примера отрывок, касающийся Адама (Бытие 5, 3–5):

«Адам жил сто тридцать [230] лет и родил [сына] по подобию своему [и] по образу своему, и нарек ему имя: Сиф. Дней Адама по рождению им Сифа было восемьсот [700] лет, и родил он сынов и дочерей. Всех же дней жизни Адамовой было девятьсот тридцать лет; и он умер».

Не будем заостряться пока на том, что ни в 130, а тем более ни в 230 лет зачинать дитя у нас как-то не получается. Эти числа только добавляют недоумения. Они из той же серии, что и общая продолжительность жизни Адама. К их объяснению мы еще вернемся. Обратим же внимание на существование в тексте исправлений, заключенных в квадратные скобки. Они были сделаны во время перевода Библии на греческий язык (III век до н. э.).

Этот перевод именуется переводом Семидесяти, или Септуагинтой, что по-латински означает семьдесят. Основание для такого названия заключается в легенде о происхождении этого перевода. Узнав о существовании в Иудее закона Моисеева, египетский царь Птолемей Филадельф (III в. до н. э.) поручил своему придворному, еврею Аристею, организовать перевод этого закона на греческий язык. Тот, в свою очередь, отправил письмо иерусалимскому первосвященнику с просьбой о присылке переводчиков. Прибыли 72 человека – по 6 от каждого из 12 колен израильских. Их поселили на острове Фарос, где каждый в течение 72 дней осуществлял свой перевод Пятикнижия (первых пяти книг Ветхого Завета, приписываемых Моисею). Цитаты из Ветхого Завета в Новом Завете чаще всего приводятся по греческому переводу, а не по древнееврейскому тексту, принятому иудеями и именуемому учеными масоретским (по названию сообщества древних еврейских библеистов-богословов, «упорядочивавших» священные для евреев рукописи). Древнейшие христианские церкви – восточные, православные, и западная, католическая, принимают Ветхий Завет по тексту Септуагинты.

Задумайтесь, дорогой читатель. При переводе с одного языка на другой можно изменять смысл фразы, дополнять ее новым содержанием. Но в тексте исправлены величины чисел. Причем кор-

ректоровки внесены таким образом, что время жизни Адама не изменилось. Но это означает, что священным (неприкосновенным!) было только это число. Оно и составляло «пласт» древнейшей информации. Возраст, в котором Адам зачал сына, к таким сведениям не принадлежал. Связанная с этим информация была вставкой в первоначальный документ, и переводчики знали об этом. Отсюда и проистекает их смелость. Какую же они преследовали цель?

Тут самое время поговорить о способе составления хронологической таблицы. Чтобы, например, узнать, какой период времени охватывает жизнь двух первых патриархов, надо к возрасту Адама, в котором он произвел Сифа, прибавить время жизни последнего. При этом длительность жизни Адама становится совершенно несущественной. При подсчете периода жизни трех патриархов выпадет и время жизни Сифа, и так далее. В результате на первый план выходят числа, обозначающие возраст, в котором патриарх рождает сына, то есть «придуманные» числа, введенные составителями Книги Бытия искусственно. Числа же, обозначающие время жизни патриархов и представляющие слой первичной (важнейшей!) информации, становятся чисто декоративными. Отталкиваясь от этого наблюдения, мы утверждаем, что составители Книги Бытия намеренно изменили принцип построения древнейшей хронологии.

По нашему мнению, в качестве изначальной информации они имели только данные о времени жизни патриархов. Причем это время, конечно же, соответствовало вовсе не продолжительности жизни какого-то отдельного патриарха. Нелепо говорить о человеке, живущем несколько веков. 930 лет род Адама возглавлял первых людей, ему на смену пришел род Сифа и так далее. При нашей интерпретации библейского летоисчисления определяющими становятся времена жизни патриархов, которые принимаются за время правления человеческим сообществом определенной династии (рода). Вместо параллельного способа построения библейской хронологии мы предлагаем последовательный. В результате она «расправляется» и обретает, как станет ясно, содержательный смысл.

Изложим нашу версию создания библейской хронологии. У ее создателей имелся исходный текст примерно следующего содержания:

Род Адама – 930 лет;
Род Сифа – 912 лет;
Род Еноса – 905 лет;
Род Каинана – 910 лет;
Род Малеиила – 895 лет;
Род Иареда – 962 года;
Род Еноха – 365 лет;
Род Мафусала – 969 лет;
Род Ламеха – 777 лет;
Род Ноя – 950 лет и т. д.

Не надо быть большим математиком, чтобы сразу же увидеть, как удревняется эра Адама, вре-

мя сотворения мира. Ной приплыл с севера [1], с какой еще стороны можно было причалить к горе Арарат? Но это значит, что все библейские патриархи до Ноя, начиная с Адама, проживали к северу от Кавказского хребта. Чтобы «перенести» центр мира, райский сад в Междуречье, создатели Книги Бытия решили «отрезать» период северной истории человечества, сократив хронологию.

В ее новой схеме название целого рода теперь присваивалось одному человеку, а в систему летоисчисления вводился возраст, когда данный патриарх родил своего наследника. Последовательная схема летоисчисления родов превращалась в параллельную схему наследования патриархов, и время сотворения мира тем самым сокращалось. При этом, однако, в тексте появились весьма странные для здравомыслящего человека утверждения. Патриархи зачинали первенцев и в 130, и в 187, и даже в 500 лет, как Ной, а жили чуть ли не тысячелетие. Может быть, сочинителями и это тоже учитывалось: фантастические детали снижали интерес к действительной хронологии. Читатели в своем большинстве не придавали содержащимся там числовым указателям никакого значения. А для сомневающихся любознательных современная Толковая Библия специально разъясняет: «В Библии нет полной и точной хронологии, а имеющаяся – довольно условна и относительна и, по крайней мере в некоторых своих отделах, по всей вероятности, внесена в нее позднее».

Но для переводчиков Библии на греческий язык вопрос датировок был очень даже принципиален. При изложении родословной от Адама до Авраама они внесли 25 хронологических исправлений. Главным образом увеличивался возраст патриархов, в котором они рождали сыновей. Переводчики не меняли текст, но своими правками в числах меняли библейскую хронологию мира (при этом дата сотворения мира изменилась). В итоге у иудеев и, например, у православных она не совпадает. Но отличие в числах не очень существенно. Эффект «греческой» корректировки носит лакировочный характер. Переводчики Библии не восстановили правильное летоисчисление, но своими действиями они как бы подсказали нам, что древнейшая библейская хронология несет в себе глубокий содержательный смысл и к ней надо присмотреться внимательнее.

Мы предлагаем принять вариант последовательной схемы. Для всех лиц от Адама до Авраама считается, что их время жизни – это период существования правящего рода, олицетворением которого они являются. Для подсчета периода, прошедшего от Адама до соответствующего патриарха, надо просто сложить время жизни всех патриархов, которые жили до него. В качестве истинных дат их земного существования, естественно, примем данные еврейской (изначальной) Библии.

Посмотрим на хронологическую схему Книги Бытия взглядом беспристрастного историка. Она представляет строго датированную генеалогию по мужской линии от Адама до прихода Авраама в Ханаан (Палестину). Согласно изначальной

(еврейской) Библии этот период составляет 11581 год. Время появления Авраама – в Палестине – около 1350 г. до н. э. Прибавив к нему вычисленное ранее время жизни предшествовавших ему библейских патриархов – 11581 год – получаем 12931 год до н. э. Это приблизительное время начала библейской истории, время Адама и Евы, действительное время «сотворения мира». Соответственно с каждым из патриархов можно соотнести определенный исторический период или эру. Окружая даты, их последовательность можно представить следующим образом:

Эра Адама: 13 тыс. лет до н. э.;
Эра Сифа: 12–11,1 тыс. лет до н. э.;
Эра Еноса: 11,1–10,2 тыс. лет до н. э.;
Эра Каинана: 10,2–9,3 тыс. до н. э.;
Эра Малелеила: 9,3–8,4 тыс. до н. э.;
Эра Иаредда: 8,4–7,4 тыс. лет до н. э.;
Эра Еноха: 7,4–7 тыс. до н. э.;
Эра Мафусала: 7 тыс. до н. э.;
Эра Ламеха: 6–5,2 тыс. лет до н. э.;
Эра Ноя: 5,2–4,2 тыс. лет до н. э.

Эта таблица представляет хронологию правящих родов северной цивилизации, и потому уже имеет исторический смысл. Стоит воздать должное хранителям библейской традиции, которые были полны уважения к священным числам, обозначавшим время жизни патриархов. Многие века богословы пытались обосновывать их на потеху атеистам. Но теперь это можно не делать. Объясняя и логически обосновывая появление трудных мест в Библии, мы снимаем с души всех почитающих Книгу Книг тяжелый камень. Правда, при этом следует отказаться от одного, навязанного всем нам стереотипа, будто вся библейская история разворачивалась исключительно в Месопотамии и на Ближнем Востоке.

Вполне понятно, что читатель ждет дополнительных доказательств в правильности введенной нами хронологии. В связи с этим обратим внимание, что эра Ноя (5,2–4,2 тыс. до н. э.) – первого

библейского патриарха, появившегося в Передней Азии, накладывается на время зарождения цивилизации Шумера (древнейшей из всех «южных»). Это указывает на согласованность библейской картины развития человеческой цивилизации и нашей хронологии с реальной историей.

С другой стороны, дата сотворения мира, которую предлагает параллельная хронология, приблизительно тоже соответствует эре Ноя. Что же получается? Составители Книги Бытия сокращали время существования от Адама таким образом, чтобы исходная точка человеческой истории совпала с датой возникновения древнейших государств в Месопотамии. Причины редакционной правки, таким образом, обнажаются совершенно явным образом. Жрецам был дан политический заказ «сверху», и они остроумно исполняли, не потревожив ключевые даты «южной» истории человечества. Причина, по которой был изменен принцип хронологии, состояла в том, что **все библейские патриархи до Ноя были северянами и проживали на территории Русской Европы.**

Всякая историческая эпоха становится на порядок ясней и содержательней, когда обретает временные вехи. Последовательная хронология определяет их и вместе с тем открывает новые горизонты в исследовании истории северной цивилизации. Библия обозначает 13-е тысячелетие до н. э. как эпоху первых людей на Земле. Чем же знаменательно это время? Палеоантропологи определяют момент возникновения человека современного типа (*Homo sapiens sapiens* – подвид Человека Разумного) временем 15 тысяч лет назад [2], то есть 13-м тыс. до н. э. Точь-в-точь как наша, последовательная хронология Книги Бытия! Такого рода совпадения не могут не впечатлять...

Литература

1. *Абрашкин А.А.* Русь Средиземноморская и загадки Библии. М. : Вече, 2003.
2. *Поршнев Б.Ф.* О начале человеческой истории. М. : Мысль, 1974.

Основной фактор неоднородности семантической сети

И.О. Александров^{1,2}, Н.Е. Максимова¹

¹ФГБУН Институт психологии РАН, Москва, almax2000@inbox.ru

²ФГБУ ВПО ГАУГН, Москва

Формализм «семантическая сеть», как связанные отношениями семантические единицы, широко применяется для описания организации предметных областей [1, с. 54] в исследованиях содержательных характеристик объектов предметных областей и их отношений [14], психосемантики [15].

Г.С. Осипов охарактеризовал один из классов семантических сетей как неоднородную семантическую сеть на основании разнообразия типов связей (отношений) между компонентами. Для идентификации логико-алгебраических типов отношений он использовал аксиоматически определенные свойства отношений – рефлексивность (*НЕ*рефлексивность, *АНТИ*рефлексивность), симметричность (*НЕ*симметричность, *АНТИ*симметричность), транзитивность (*НЕ*транзитивность, *АНТИ*транзитивность). Выраженность каждого из этих свойств, обозначаемая префиксами *НЕ* и *АНТИ* (а также отсутствием префиксов), введена Осиповым формально. В этой типологии каждое отношение характеризуется триадой «рефлексивность, симметричность, транзитивность», и, учитывая использование префиксов, она потенциально описывает 27 типов отношений, а принимая особо оговоренное Осиповым свойство асимметрии [14, с. 34] – 36 типов. На множестве теоретически возможных связей для объектов предметных областей Осиповым описано 9 типов отношений.

За прошедшую четверть века представления об основаниях неоднородности семантических сетей существенно расширены. Организацию неоднородной сети представляют как сумму локальных качественно различных областей или как иерархию субсетей. Одна из современных концепций неоднородных семантических сетей оценивает сложность такой иерархической структуры как предельную (см. название сборника работ, посвященного описанию таких сетей: «Networks of Networks: The Last Frontier of Complexity», [18]).

Заметим, что в работах, рассматривающих организацию неоднородных семантических сетей, их основное свойство, неоднородность, задается воспроизведением разнообразия семантических связей (или логических отношений) моделируемой предметной области. При этом остается неясным, какое фундаментальное свойство сетей этого класса позволяет фиксировать разнообразие этих отношений, ограниченное лишь правилами построения графов. Представляется, что объяснение этого свойства сети должно опираться на закономерность, лежащую в основе неоднородности.

Формализм неоднородной семантической сети в версии, предложенной Осиповым, был применен для исследования психологических структур (ПС),

формирующихся при приобретении компетенции в стратегической игре «Крестики-нолики на поле 15×15», поскольку ПС характеризуется как множество компонентов, связанных отношениями различного типа [2]. Этот формализм обладает не только высоким потенциалом описания ПС, но также открывает возможности введения новых конструктов как расширения перечня логико-алгебраических отношений, что непосредственно следует из определений и аксиоматики, введенных Осиповым, так и принципиально новых атрибутов сети, необходимость которых следует из теоретико-эмпирических разработок.

Цель данного сообщения – на основании результатов изучения ПС, полученных в исследованиях, выявить в суборганизации компонентов ПС фактор, придающий семантической сети, описывающей целостную ПС, свойство неоднородности.

Основное предположение данной работы состоит в том, что неоднородность семантических сетей – проявление сложной организации «сущностей», отображаемых вершинами сети; в данном исследовании – это сложность организации компонентов ПС (соответствующих вершинам сети).

Для применения формализма неоднородной семантической сети к изучению ПС *как предмета, обладающего статусом существования (онтологическим статусом)*, недостаточно установить соответствие логических конструктов («множества S имен предметов и процессов реального мира и семейства R отношений на множестве S» [14, с. 49]) абстрактным сущностям графа сети («вершинам» и «ребрам/дугам»). Необходимо указать на онтологически определенные и операционализуемые конструкты, соответствующие абстрактным и логическим понятиям, в которых описываются неоднородные семантические сети.

В предлагаемом объяснении неоднородности семантической сети ее вершинам (предметам и процессам) соответствуют компоненты ПС, носители информационных моделей двух родов, фиксированных в специализациях нейронов. Ребрам и дугам сети (семейству отношений на множестве вершин) соответствует реализация взаимодействий, продукты которых фиксируются во взаимодействующих информационных моделях [2, 4, 12, 13, 16].

Модель в обобщенном понимании – это избирательное отображение свойств определенного (моделируемого) объекта в организации другого (моделирующего) объекта [16]. Из этого определения следует, что вершины сети являются моделями отображаемых сетью объектов. Модельные отображения в сети соответствуют определению семантики как соотношения означаемых и означающих систем, а сеть в целом является семанти-

ческой структурой. Важно, что вершина сети – логическое, не вещественное, отображение объекта, и не обладает онтологическим статусом. Модели, которые фиксируются на каком-либо субстрате, приобретают статус существования, онтологизируются. Особый класс моделей, информационные модели, могут быть зафиксированы на различных видах субстрата, сохраняя в различных субстратах подобие, гомоморфное соответствие между собой. Так, информационные модели взаимодействий фиксируют на основе субстрата характеристики, важные для носителя моделей, включая логические свойства взаимодействий (представленные как логические отношения ребрами и дугами сети), в онтологизированном виде. Важно, что набор свойств информационной модели не ограничен логическим отношением, которое воспроизводит модель, он включает все характеристики, важные для сохранения и инициации модели, условий, соблюдение которых необходимо для актуализации и достижения цели фиксированного в ней взаимодействия, и т. п. Фиксация информационной модели на субстрате определяет возможность развития ее содержания, включения в ее структуру характеристик прямых и побочных продуктов реализованных взаимодействий, что является основой дифференциации и эволюции как конкретной информационной модели, так и целостной структуры, в составе которой данная модель сформировалась. Таким образом, онтологический аналог логической вершины семантической сети представляет информационную модель взаимодействия, содержательно независимую от субстрата, на котором эта модель фиксирована, включенную в эволюционный процесс формирования этой целостной структуры, т. е. имеющую предковые и дочерние формы. Именно эти свойства с необходимостью указывают на онтологический статус информационных моделей.

На приведенных основаниях логическая структура семантической неоднородной сети может быть преобразована в онтологически определенную, гомоморфную ей, ПС, представленную компонентами и их взаимодействиями.

Каждый компонент ПС онтологически представлен группой нейронов, носителей общей специализации относительно информационной модели цикла взаимодействия индивида с институционализированной предметной областью (ИПО), см. [10; 11]. Операционально это свойство группы нейронов описывается как специализация относительно конкретного поведенческого акта [6, 7, 8].

Взаимодействия между компонентами ПС обеспечиваются актуализацией информационных моделей этих взаимодействий. Чтобы ввести различие между информационной моделью взаимодействия с ИПО, носителем которой является компонент, и информационной моделью взаимодействия между компонентами структуры, обозначим модели взаимодействия с ИПО как *модели 1-го рода*, а модели взаимодействия между компонентами – как *модели 2-го рода* [3, 5].

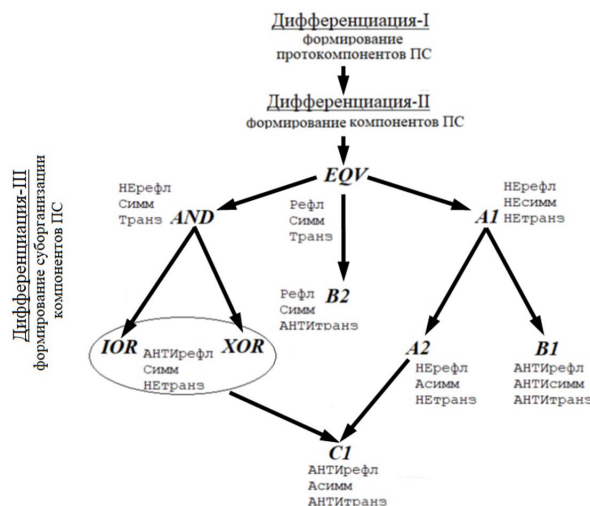


Рис. 1. Логико-алгебраические свойства отношений между компонентами ПС.

Обозначения отношений: *EQV* (эквивалентность), *AND* («И»), *XOR* (исключительное «ИЛИ»), *IOR* (неисключительное «ИЛИ»), *A1* (нестрогий порядок), *B1* (строгий порядок), *B2* (петли).

Обозначения свойств отношений: «Рефл» – рефлексивность, «Симм» – симметричность, «Транз» – транзитивность; префиксы «НЕ~», «АНТИ~», «А~».

Овал объединяет отношения *IOR* и *XOR*, имеющие одинаковые логико-алгебраические свойства, в один вид [14, с. 39].

Стрелками показаны генетические связи различных типов отношений и формирование новых типов отношений путем сокращения степеней свободы какого-либо из трех их свойств.

Стрелки, ведущие к *C1* от группы отношений *IOR* и *XOR* (принадлежащих к одному виду отношений, что показано овалом), а также от отношения *A2*, указывают на гибридный характер отношения координации, который связывает фундаментально различные подмножества семантической сети САС и СПС

Для ПС в стратегической игре двух партнеров «Крестики-нолики на поле 15×15» показано существование девяти типов отношений между компонентами (рис. 1). Каждый компонент ПС может вступать в отношения разных типов с другими компонентами и, следовательно, кроме фиксированной в его структуре модели 1-го рода, может быть носителем множества семантически различных информационных моделей 2-го рода.

Два класса отношений, синхронических и диахронических, организуют на неоднородной семантической сети две «подсети» – «семантическую ассоциативную сеть» (ее образуют симметричные отношения *AND*, *XOR* и *IOR*, см. рис. 1) и «семантическую пропозициональную сеть» (ее связывают несимметричные, асимметричные и антисимметричные отношения *A1*, *A2*, *B1*, *B2*). Подмножества единой сети САС и СПС формируются на одном и том же множестве компонентов, и все различия в организации этих подсетей связаны с разнообразием информационных моделей 2-го рода.

В определении, предложенном Осиповым и воспроизводимым в литературе [17, р. 644], свойство неоднородности семантической сети

придает разнообразие типов отношений, связывающих компоненты ПС. В литературе указывается, что неоднородность семантической сети порождается также и семантическим разнообразием ее вершин [19, р. 174], но многообразие семантик множества моделей 2-го рода, входящих в состав одного компонента, значительно дополняет обоснование свойства неоднородности семантической сети за счет фактора развивающейся семантической неоднородности компонента ПС.

Важно, что если для организации семантической сети, описывающей предметную область, объекты «даны», а вершины сети «фиксируют» предметную область как неизменную с возможными включениями новых объектов и соответствующих им вершин, то семантическая сеть, описывающая ПС, обладает таким атрибутом, как саморазвитие и репликация [12, 13]. Ребра и дуги семантической сети, фиксирующие логические отношения между объектами предметной области, в применении к описанию ПС отображают множество типов взаимодействий между компонентами ПС релевантных информационных моделей 2-го рода. Взаимодействия между компонентами обеспечиваются информационными моделями взаимодействий, общими для этих компонентов. Группы нейронов, специализированных относительно этих моделей, принадлежат нескольким компонентам, что размывает «границы» каждого компонента. Пределы компонента могли бы быть однозначно ограничены множеством нейронов с общей специализацией относительно информационной модели 1-го рода, но на этом же множестве нейронов выделяются подмножества, специализированные относительно моделей взаимодействий с другими компонентами (моделей 2-го рода), и эти подмножества имеют представительства в нейрональном составе других компонентов.

Распределенность информационных моделей 2-го рода на двух взаимодействующих компонентах (в отображении двухместных отношений, таких, как отношение следования A-1, см. рис. 1) или на большем количестве компонентов (в случае множественных отношений, например, AND, см. рис. 1), причем каждый компонент реализует множество таких отношений одновременно, требует изменения в применении теории графов для анализа организации семантической сети, описывающей ПС. Сложная организация компонента (как множества взаимопересекающихся информационных моделей взаимодействия 1-го и 2-го рода) в терминах теории графов не может быть передана с помощью формализма «стянутых вершин» ([9]), поскольку такой прием не предусматривает именно сложной суборганизации вершины графа. Возможно, к преодолению этой трудности позволит приблизиться понимание графа (и отображаемой им сети) не как пары (V, E) , где V – множество вершин графа, а E – множество ребер, а как «тройки (V, E, P) , где V – множество вершин, E – множество объектов некоторой природы, отличной от природы вершин, называемых ребрами, P – инцидентор, сопоставляющий каждому ребру

E пару граничных вершин v и w из V » [9, с. 21]. Конструкт «инцидентор», представляющий «сущность» в этой версии понимания организации графов, открывает возможность описания суборганизации вершины, в котором инциденторы соответствуют моделям взаимодействия 1-го и 2-го рода, совокупность которых образует компонент сети, а также эксплицитно вводит возможность связи двух вершин множеством дуг, даже в том случае, если они соответствуют одному и тому же типу отношений, в отличие от представления графа как пары (V, E) , которое этого не допускает.

Таким образом, наиболее фундаментальный фактор, закономерно определяющий неоднородность ПС, – сосуществование в рамках одного компонента множества информационных моделей 1-го и 2-го рода, которое формирует новую, «обогащенную» семантику компонента, определяемую совокупностью семантики модели 1-го рода, и различающихся семантик множества моделей 2-го рода. Именно этот фактор проявляется в многообразии отношений на множестве вершин семантической сети, и закономерно определяет ее неоднородность.

Предложенное объяснение неоднородности семантической сети построено для ПС как особенного предмета исследования. Может ли быть применена эта аргументация к семантическим сетям, которые в соответствии с определением Осипова описывают предметные области как множества «имен предметов и процессов реального мира и ... отношений» на этих множествах [14, с. 49], к семантическим сетям как инструментам психосемантики [15] или социальных исследований [17]?

Сфера применения предложенного объяснения может охватывать объекты, для которых в «сетевом» представлении может быть описана суборганизация, составляющие которой необходимы для обеспечения взаимодействий, и которым могут быть атрибутированы свойства информационных моделей. Несомненно, что «имена предметов» [14], единицы психосемантического анализа [15] могут обладать такими свойствами. Частично эти характеристики проявляются в свойстве полисемии, в одновременно реализуемом многообразии отношений (взаимодействий) с этими объектами. Возможно, одним из подходов к выявлению в «объектах мира» свойств информационных моделей может служить их включенность в процессы взаимодействия индивидов с ними как с составляющими институционализированных предметных областей и предполагаемая фиксация в их структуре информационных моделей этих взаимодействий [10, 12, 13].

Исследование выполнено по Государственному заданию Минобрнауки РФ № 0138-2023-0002.

Литература

1. Аверкин А.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. Толковый словарь по искусственному интеллекту. Москва : Радио и связь, 1992.

2. *Александров И.О.* Формирование структуры индивидуального знания. Москва : Институт психологии РАН, 2006.
3. *Александров И.О., Максимова Н.Е.* Процесс дифференциации: содержание концепта и возможности операционализации в психологических исследованиях / Дифференционно-интеграционная теория развития. Кн. 2. Москва : Языки славянской культуры, 2014. С. 87–138.
4. *Александров И.О., Максимова Н.Е.* Значение принципа взаимодействия/развития для исследования коммуникации // Образование и развитие личности в современном коммуникативном пространстве: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Под общей редакцией И. М. Кыштымовой. Иркутск: Аспринт, 2016. С. 8–16.
5. *Александров И.О., Максимова Н.Е., Горкин А.Г.* Компоненты структуры знания: их взаимодействия и суборганизация // Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2008 : труды конференции. 2008. Т. 1. Москва : ЛЕНАНД. С. 344–352.
6. *Александров Ю.И.* Закономерности актуализации индивидуального опыта и реорганизации его системной структуры: комплексное исследование // Труды ИСА РАН. 2011. Т. 61, № 3. С. 4–29.
7. *Горкин А.Г., Шевченко Д.Г.* Стабильность поведенческой специализации нейронов // Журн. высшей нервной деят. 1990. Т. 40, № 2. С. 291–300.
8. *Горкин А.Г., Шевченко Д.Г.* Отражение структуры памяти в активности системоспецифичных нейронов // Психол. журн. 1991. Т. 12, № 2. С. 60–69.
9. *Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А.* Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
10. *Максимова Н.Е., Александров И.О.* Компоненты психологического взаимодействия и возможность их операционализации // Человек, субъект, личность в современной психологии / Отв. ред. А.Л. Журавлев, Е.А. Сергиенко. Материалы конференции. Т. 3. Москва : Изд-во «Институт психологии РАН», 2013. С. 161–164.
11. *Максимова Н.Е., Александров И.О.* Возможная траектория эволюционного развития психологии. Часть II. Организация предметной области психологии // Психол. журн. 2016. Т. 37, № 2. С. 5–18.
12. *Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С.* Дифференциация и организация психологических структур при взаимодействии индивида с новыми предметными областями. Часть I. Свойства аутореплицирующихся структур и их операционализация // Психол. журн. 2019. Т. 40, № 1. С. 15–27.
13. *Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С.* Дифференциация и организация психологических структур при взаимодействии индивида с новыми предметными областями. Часть II. Эмпирические доказательства существования аутореплицирующихся структур // Психол. журн. 2019. Т. 40, № 2. С. 47–65.
14. *Осипов Г.С.* Приобретение знаний интеллектуальными системами. Москва : Наука, 1997.
15. *Петренко В.Ф.* Основы психосемантики. Смоленск: Изд-во Смоленского гуманитарного ун-та, 1997.
16. *Пономарев Я.А.* Методологическое введение в психологию. Москва : Наука, 1983.
17. *Alhajj R., Rokne J.* (Eds.) Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining. New York: Springer Science+Business Media, 2014.
18. *D'Agostino G., Scala A.* (Editors) Networks of Networks: The Last Frontier of Complexity. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer International Publishing, 2014.
19. *Estrada E.* The Structure of Complex Networks. Theory and Applications. Oxford, New York: Oxford University Press, 2011.

Об оценке количества ценной информации, содержащейся в данных наблюдений

А.К. Алексеев

МФТИ, Долгопрудный, Моск. обл.

Из определения количества информации Шеннона, содержащегося в некотором тексте длиной m знаков, имеющих вероятность появления P_i :

$$I_{Sh} = -\sum_i^m P_i \log_2 P_i, \quad (1)$$

легко видеть, что количество информации вычисляется элементарно, но при перестановке символов местами не изменяется, т. е. к содержанию послания информация Шеннона отношения не имеет. Это было ясно с самого начала [1]: «... *two messages, one heavily loaded with meaning and the other pure nonsense, can be equivalent as regards information*».

В противоположность этому, интуитивное понятие информации относится к чему-то качественно иному, типа рецепта, инструкции, и не допускает отсутствия смысла [2], однако такие простые оценки количества информации, как (1), для него отсутствуют. В работах [3, 4] показано, что одна из возможных реализаций интуитивного понятия информации – «ценная информация» – строится на основе теории оценивания Фишера [5, 6] и обладает практически всеми свойствами интуитивной информации. Однако ее структура, содержащая как векторную (score, informant), так и тензорную (матрица Фишера) компоненты, затрудняет оценку количества информации с помощью некоторого скалярного выражения. Тем не менее информационная матрица Фишера имеет следующие скалярные инварианты, которые можно рассматривать в качестве претендентов на количество информации, это:

информация Фишера

$$I_F = \text{tr}(F), \quad (2)$$

информация Шеннона

$$I_{Sh} = 1/2 \log_2 \det(F). \quad (3)$$

Здесь мы рассмотрим возможную оценку количества ценной информации с помощью этих инвариантов на примере одного из классов обратных статистических задач [6, 7, 8]. Эти задачи посвящены определению вектора параметров u_j некоторой системы по наблюдениям, содержащим шум. Пусть оператор задачи $Au = f$ известен в матричном виде. Считаем, что из анализа измерений случайного вектора $f_i' \in R^m$ у нас есть среднее $\langle f_i' \rangle = f_i^{obs}$ и ковариационная матрица погрешностей эксперимента W^{-1} . Представим результаты эксперимента в виде $f_i' = f_i^{obs} + \delta f_i'$. Предположим, что ошибка измерений является нормально распределенным случайным вектором:

$$\rho(\delta f') = C_f \exp(-(\delta f', W \delta f') / 2). \quad (4)$$

Нас интересует случайный вектор u_i' , такой, что

$$Au' = f' = f^{obs} + \delta f'$$

и, соответственно,

$$Au' - f^{obs} = \delta f'. \quad (5)$$

Соотношение (5) позволяет получать разные интерпретации (4):

$$\rho(\delta f') = \rho(u' | f^{obs}) = \rho(f^{obs} | u').$$

Обратная задача в статистическом виде может быть сформулирована как поиск вероятности $\rho(u' | f^{obs})$ того, что мы имеем u' при среднем измерений f^{obs} .

Скалярное произведение в (4) имеет вид

$$(\delta f', W \delta f') = ((Au' - f^{obs}), W(Au' - f^{obs})).$$

Пользуясь симметричностью матрицы W , получим

$$(\delta f', W \delta f') = (u', Fu') - 2(b, u') + (f^{obs}, W f^{obs}).$$

Объединяя множители, не зависящие от u_i' , получим стандартное выражение для нормально распределенного случайного вектора u_i' :

$$\rho(\delta f') = C_1 \exp(-(u', Fu') / 2 + (b, u')), \quad (6)$$

$$C_1 = C_f \exp(-(f^{obs}, W f^{obs}) / 2).$$

Мы интерпретируем (6) как $\rho(u' | f^{obs})$.

Выражение (6) определит интересующее нас решение u' как точку максимума плотности вероятности.

При этом ковариационная матрица ошибки результата решения обратной задачи имеет вид

$$F^{-1} = (A^*WA)^{-1} = Cov_{u'} \quad (7)$$

и получается обращением информационной матрицы Фишера.

Важно отметить, что в случае некорректно поставленной задачи матрицы Фишера $F = (A^*WA)$ недостаточно для однозначного определения решения и его погрешности. Дело в том, что матрица Фишера близка к вырожденной и ее обращение приводит к сильной неустойчивости, что требует регуляризации задачи.

В рамках статистической регуляризации [6, 7, 8] можно использовать матрицу $D = Cov_a^{-1}$, содержащую априорную информацию об искомом решении (в виде обратной ковариационной матрицы априорного распределения):

$$\rho(u') = C \exp(-(u', Du') / 2). \quad (8)$$

Интерпретируя (6) как $\rho(f^{obs} | u')$ [6] и используя теорему Байеса

$$P(u' | f^{obs}) = \frac{P(u')P(f^{obs} | u')}{P(f^{obs})},$$

можно получить решение вида

$$u = (A^*WA + D)^{-1} A^*Wf^{obs} \quad (9)$$

с ковариационной матрицей погрешности

$$(A^*WA + D)^{-1} = (F + D)^{-1}. \quad (10)$$

Априорную информацию вида

$$P(u) = C \exp(-((u - u_0), D(u - u_0)) / 2)$$

($D = \sigma E$, E – единичная матрица) можно интерпретировать как знание, что точное решение находится в гиперсфере радиуса $1/\sigma$ с центром в u_0 .

Учет ценной информации, содержащейся в наблюдениях, позволяет утверждать, что истинное решение находится в гиперэллипсоиде

$$A^*WA + D = F + D$$

с центром в u_1 :

$$u_1 = u_0 - (A^*WA + D)^{-1} A^*W(Au_0 - f^{obs}). \quad (11)$$

Выражения (10), (11) позволяют оценить количество ценной информации, содержащейся в измерениях через информацию Шеннона (рис. 1).

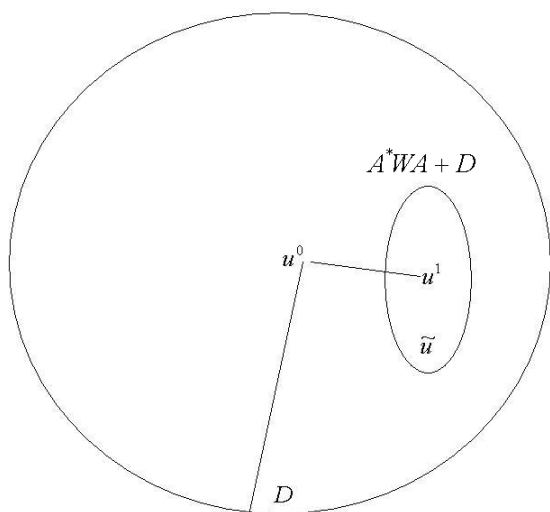


Рис. 1

Информация Шеннона

$$I_{Sh} = - \int \rho(u) \ln \rho(u) du$$

для Гауссова распределения

$$\rho(u) = \det(Cov_u)^{-1/2} (2\pi)^{-m/2} \exp(-1/2u Cov_u^{-1}u)$$

имеет вид

$$I_{Sh}(\rho) = -1/2 \log_2 \det(Cov_u) + \text{const}$$

и является логарифмом детерминанта ковариационной матрицы погрешности оценки управляющих параметров. Детерминант ковариационной матрицы можно представить как объем в пространстве управляющих параметров, соответствующий неопределенности оценки.

Изменение информации Шеннона при изменении соответствует ее изменению от значений

априорной информации $Cov_a = D^{-1}$ до результатов оценки $Cov_u = (F + D)^{-1}$:

$$\Delta I_{Sh} = 1/2 \log_2 \det(F + D) - 1/2 \log_2 \det(D). \quad (12)$$

Таким образом, количество ценной информации, содержащейся в измерениях, можно рассчитать через отношение объемов гиперсферы и гиперэллипсоида, содержащих истинное решение до измерения и после [9] (рис. 1) и соответствующую вариацию информации Шеннона.

Изменение информации Шеннона существенно зависит от априорной информации D , даже если задача корректна и F обратима. При полной начальной неопределенности ($D = 0$) выражение (12) сингулярно и от результатов измерений не зависит. Это вполне естественно, так как, в соответствии с [3, 4], ценная информация и должна зависеть от априорной информации системы (таблица интегралов для неграмотного не содержит ценной информации).

Информация Фишера

$$I_F = \text{tr}(Cov_u^{-1}) = \text{tr}(F)$$

также часто используется как мера информации и соответствует обратной усредненной дисперсии. Прирост информации Фишера в измерениях можно оценить сравнением информационных вкладов априорной информации (регуляризации) $\text{tr}(Cov_a^{-1})$ и измерений $\text{tr}(Cov_u^{-1})$. Разность следов обратных ковариационных матриц результата и априорной информации имеет вид

$$\text{tr}(Cov_u^{-1}) - \text{tr}(Cov_a^{-1}) = \text{tr}(F + D) - \text{tr}(D) = \text{tr}(F).$$

Прирост информации Фишера при измерениях лишен сингулярностей и не зависит от априорной информации D . Однако, в отличие от изменения информации Шеннона, изменение информации Фишера не имеет такого прозрачного физического смысла, хотя определенный геометрический смысл присутствует. В соответствии с интерпретацией [10], в отличие от информации Шеннона, связанной с объемом некоторого характерного эллипсоида, информация Фишера связана с соответствующей площадью поверхности этого объема и не стремится к нулю при вырождении.

Информация Фишера соответствует сумме собственных чисел в некотором базисе и (в сравнении с информацией Шеннона) менее чувствительна к неустойчивостям, возникающим при решении обратных задач (вплоть до того, что способна детектировать ситуации, когда данные измерений ухудшают априорную оценку). По сути, при расчете информации Фишера происходит неявная «Оккамовская» регуляризация задачи [7] за счет автоматического удаления малых собственных чисел. Поэтому результат и не зависит от априорной информации в форме [8]. Информация Фишера соответствует информации Шеннона в пространстве основных компонент (пространстве меньшей размерности). К сожалению, при переходе к пространству основных компонент от основного пространства решений в значительной степени теряется физический смысл информации Шен-

нона (вместо объема в физическом пространстве мы имеем дело с объемом в некотором трансформированном пространстве меньшей размерности).

Заключение

Количество априорной информации можно рассматривать как некоторый объем (в простейшем случае – объем гиперсферы), содержащий истинное решение. Вследствие измерений объем, в котором содержится искомое решение, уменьшается.

Изменение количества информации Шеннона, которое соответствует соотношению этих объемов, можно интерпретировать как количество ценной информации, содержащееся в измерениях.

К сожалению, одного параметра достаточно для описания тензора только в простейшем случае, когда он соответствует сфере. Достаточно легко представить ситуацию, когда уменьшение объема сопровождается растяжением эллипсоида, что приведет к резкому росту погрешности вдоль некоторых направлений. Поэтому применимость информации Шеннона для оценки количества информации при решении обратных некорректно поставленных задач ограничена. Для ее использования принципиально важно наличие априорной информации.

Количество ценной информации, содержащееся в измерениях, можно также интерпретировать как информацию Фишера (информацию Шеннона в некотором пространстве основных собственных векторов). Информация Фишера в сравнении с информацией Шеннона менее чувствительна к неустойчивостям, возникающим при решении обратных задач. Недостатком такой интерпретации

является отсутствие такого прозрачного физического смысла, как у информации Шеннона (при наличии достаточно ясного геометрического смысла).

Литература

1. *Shannon C.E. and Weaver W.* The Mathematical Theory of Communication, University of Illinois Press. 1949.
2. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М. : УРСС, 2004. 287 с.
3. *Алексеев А.К., Бондарев А.Е.* О ценной информации в обратных задачах и ее визуализации: Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 34. 20 с.
4. *Alexeev A.K., Bondarev A.E.* On Important Information Dynamics // *Mathematica Montisnigri*. 2016. V. XXXV. P. 68–89.
5. *Fisher R.A.* Theory of statistic estimation // *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 1925. V. 25. P. 700–725.
6. *Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С.* Использование методов математической статистики для решения некорректных задач // *Успехи физ. наук*. 1970. Т. 102, № 3. С. 345–386.
7. *Теребиж В.Ю.* Введение в статистическую теорию обратных задач. М. : Физматлит, 2005. 375 с.
8. *Устинов Е.А.* К решению задачи численного дифференцирования методом статистической регуляризации // *Космические исследования*. 1990. Т. 28, № 4. С. 545–554.
9. *Singh K., Sandu A., Jurdak M., Bowman K.W. and Lee M.* A practical method to estimate information content in the context of 4D-Var data assimilation // *SIAM/ASA Journal of Uncertainty Quantification*. 2013. V. 1. P. 106–138.
10. *Cover T.M., Thomas J.A.* Elements of Information Theory. NY: Wiley-Interscience, 2006.

Пространственные особенности нелинейных процессов в коре головного мозга человека при поличастотной стимуляции

А.Т. Бондарь¹, А.И. Федотчев¹, С.А. Полевая², С.Б. Парин²

¹Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Московская область, a_bond@rambler.ru

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
s453383@mail.ru

Изучение нелинейных процессов в ЭЭГ может помочь в понимании более сложных механизмов мозга, а также причин возникновения неврологических и психологических расстройств, таких как эпилепсия, шизофрения, депрессия и других. Наиболее простым и эффективным способом исследования нелинейности является ритмическая фотостимуляция или SSVEP (Steady-state visual evoked potential) – это метод, используемый в нейрофизиологии для изучения электрической активности мозга в ответ на световые импульсы. Принято считать, что она создает «стабильный ритмический» (или «steady-state») эффект в мозге [1], хотя, как показали наши исследования, реакции на стимуляцию претерпевают во времени существенные изменения [2, 3]. В последние годы интерес к SSVEP усилился в связи с поиском методов прямого взаимодействия между мозгом и компьютером [4, 5]. Особенностью SSVEP является их крайне выраженный нелинейный характер, поскольку в своем спектре они содержат компоненты, не имеющие места в стимулирующем сигнале [2, 3]. Частоты этих компонент кратны частоте стимулирующего сигнала, и поэтому получили название «гармоник». Целью данной работы являлось изучение электрической реакции коры головного мозга на ритмическую поличастотную фотостимуляцию.

В экспериментах приняли участие 12 добровольцев обоих полов в возрасте от 23 до 27 лет. Запись электроэнцефалограммы осуществлялась при помощи электроэнцефалографа-анализатора ЭЭГА-21-26 «Энцефалан-131-03». Частота дискретизации сигнала – 250 Гц. Регистрация ЭЭГ осуществлялась с использованием 19 электродов, локализованных по стандартной схеме «10–20». Использовались следующие отведения: Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2.

Световые синусоидальные сигналы генерировались с помощью фотостимулятора собственной разработки, способного одновременно раздельно стимулировать левый и правый глаз стимулами, имеющими разные частоты. В первой серии экспериментов на левый глаз подавался стимул с частотой 6 Гц, а на правый – 9 Гц. Во второй серии – на левый 7 Гц, а на правый – 9 Гц.

Полученные результаты продемонстрировали однотипный характер вызванной электрической активности в коре у всех испытуемых. Он был нелинейным, поскольку в ЭЭГ индуцировались

процессы, не присутствующие в стимулирующих сигналах. Так, в спектрах ЭЭГ присутствовали хорошо выраженные компоненты, как кратные частоте стимула, так и отличные от них (рис. 1 и 2). Последние представляют большой интерес, поскольку позволяют выдвинуть гипотезу о механизмах формирования как их, так и гармонически связанных со стимулом компонент. В первой серии экспериментов таковыми были 3 и 15 Гц, а во второй – 2 и 16 Гц.

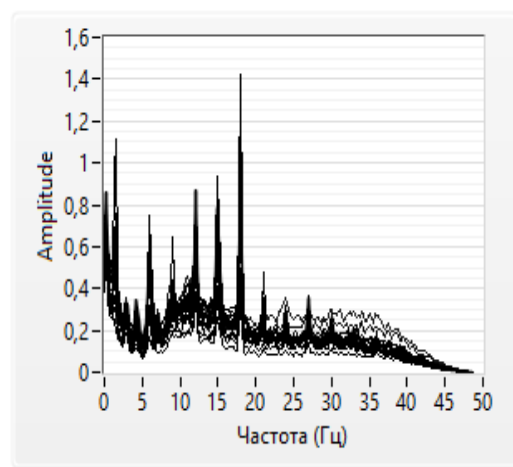


Рис. 1. Спектры ЭЭГ всех отведений при воздействии стимулом 6 Гц на левый глаз, 9 Гц – на правый

Результаты картирования индуцированных компонент спектра подтвердили полученные ранее данные с применением моночастотной стимуляции о независимой их локализации [7]. Для интерпретации нелинейных реакций нервной системы в ответ на внешние гармонические сигналы мы предлагаем *операционную модель* [3]. Эта модель применялась для интерпретации октавного принципа взаимоотношения собственных ритмов мозга между собой. В ее основе лежит *операция амплитудной модуляции* одних ритмов другими, что в формальном виде можно представить как

$$\cos(\omega_1 t) \cdot \cos(\omega_2 t). \quad (1)$$

Основываясь на тригонометрическом тождестве

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = 1/2[\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)], \quad (2)$$

данная операция при бичастотном стимулировании в нелинейной среде должна привести к появлению в спектре частот $\omega_1 - \omega_2$ и $\omega_1 + \omega_2$, что и наблюдается в эксперименте с использованием

в качестве стимулов сигналы с частотой 6 и 9 Гц в первом эксперименте, 7 и 9 – во втором. Так, в эксперименте 1 в спектрах ЭЭГ можно наблюдать разностную частоту 3 Гц и суммарную 15 Гц. Аналогично в эксперименте 2 – 2 Гц и 16 Гц.

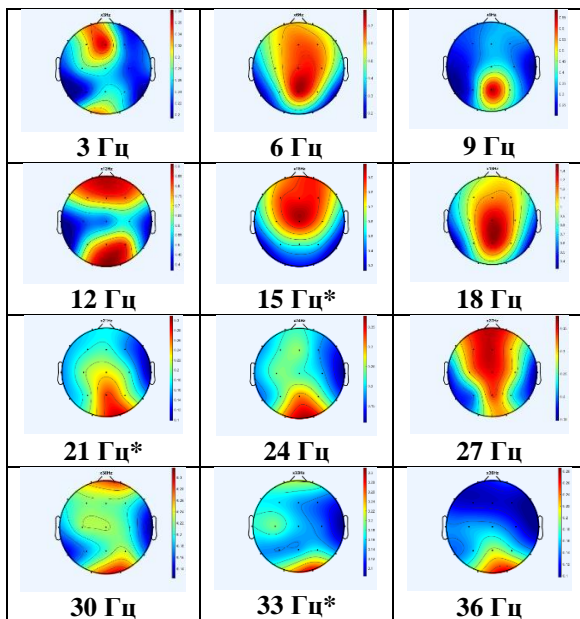


Рис. 2. Пространственное распределение индуцированных процессов при воздействии комбинированным стимулом 6 + 9 Гц. Звездочками обозначены компоненты спектра, не являющиеся кратными частотам стимулов

Стимулы 6 и 9 Гц кратны 3, следовательно, их можно рассматривать как вторую и третью гармоники 3-герцового стимула, которые в данном случае являются разностной частотой ($\omega_1 - \omega_2$). Эта частота породила свою систему гармоник, в результате в спектре появились компоненты не кратные исходным частотам стимуляции и их сумме (21 и 33 Гц). Всю систему компонент спектра в этом случае можно рассматривать как гармоники 3-герцовой компоненты. Этот факт объясняет «иллюзию отсутствующей или фантомной основной частоты (Missing Fundamental)», наблюдаемую в слуховой системе. Она заключается в том, что если в искусственно созданном сигнале, состоящем из нескольких гармоник, убрать первую гармонику (фундаментальную частоту), то слуховая система восстановит ее, и этот сигнал будет восприниматься, как будто эта частота в нем присутствует [6].

В спектрах наблюдаются также и частоты, кратные применяемым стимулам (гармоники), происхождение которых тоже можно объяснить исходя из тождества (2). Поскольку эти частоты являются независимыми процессами [2], они в рекуррентной среде, т. е. в среде с обратными связями, могут циклически амплитудно модулировать друг друга (мультиплицироваться). В результате этой операции будут образовываться множественные процессы, находящиеся в гармонических, т. е. целочисленных, отношениях друг с другом.

Несмотря на целочисленные соотношения, эти процессы не являются в строгом смысле гармониками, поскольку обладают временной и пространственной независимостью друг от друга. [7]. В дальнейшем мы будем называть их «псевдогармониками».

Аналогичную трактовку можно применить и к результатам с монотонной стимуляцией [7]. В этом случае $\omega_1 = \omega_2$ и, соответственно, $\omega_1 - \omega_2$ равна 0, а $\omega_1 + \omega_2$ – удвоенной частоте стимуляции. В рекуррентной среде, т. е. в среде с обратными связями, такая операция, организованная циклически, может породить множество псевдогармоник (рис. 3 и 4).

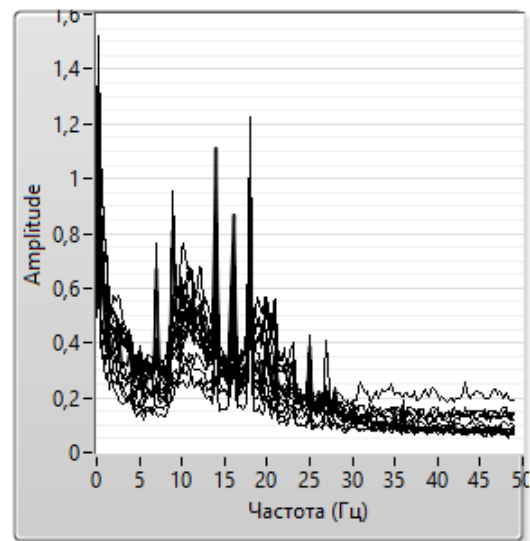


Рис. 3. Спектры ЭЭГ всех отведений при воздействии стимулом 7 Гц на левый глаз, 9 Гц – на правый

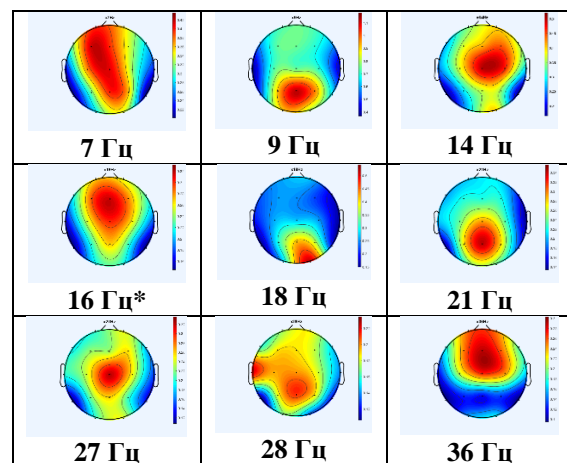


Рис. 4. Пространственное распределение гармоник при воздействии комбинированным стимулом 7 + 9 Гц. Звездочками обозначены компоненты спектра, не являющиеся кратными частотам стимулов

Этот механизм, возможно, лежит в основе вычислительных операций мозга, необходимых для выполнения различных функций, поскольку в результате нелинейного взаимодействия ритмов (мультипликации) выполнялся ряд арифметических операций: сложение, вычитание, умножение

и возведение в степень. В литературе также отмечается роль мультипликации ритмов в вычислительных процессах мозга [8].

Следует сказать, что не все целочисленно относящиеся друг к другу частоты в спектре являются псевдогармониками, хотя и имеют один и тот же механизм возникновения. Так, судорожные сигналы во время эпилептического статуса [3] имеют в спектре множество целочисленно относящихся друг к другу компонент, которые мы вправе называть гармониками. Патологические процессы могут приводить к нарушению механизма распределения псевдогармоник по разным нейронным сетям, так что циклическая мультипликация осуществляется в одной и той же сети. Это приводит к искажению исходного эндогенного ритма, его обострению и превращению в пиковую волну. В этом случае мы имеем дело с реальными гармониками в спектре, которые отражают форму сигнала. Чем больше гармоник наблюдается в спектре, тем более острыми являются сигналы.

Можно предположить, что одной из функций пространственного распределения псевдогармоник является защита в рекуррентной циклической среде от возникновения острого волнового эпилептического сигнала.

Заключение

При комплексной бичастотной фотостимуляции синусоидальными сигналами в электрической активности коры наблюдается нелинейный ответ. Он заключается в наличии в спектрах ЭЭГ компонент, не имеющих в подаваемых стимулах. Они находятся как в гармонических отношениях со стимулом, так и представляют собой суммы и разности частот стимулов. На основании этих результатов была предложена операционная модель формирования ЭЭГ реакций, в основе которой лежит операция амплитудной модуляции (мультипликации) индуцированных ритмов между собой. Продукты этих мультипликаций локализуются

в различных нейросетях, представляя собой независимые процессы. Операцию мультипликации ритмов можно рассматривать как вычислительный процесс, обеспечивающий реализацию различных функций организма.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-18-20075.

Литература

1. *Regan D.* Some characteristics of average steady-state and transient responses evoked by modulated light. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1966. V. 20. P. 238–248.
2. *Bondar A.T., Shubina L.* The Relationship Between the Rhythmic Components of the Brain Electrical Activity During the Development of Status Epilepticus: An Operational Model of Brain Rhythms Generation // *Brain connectivity.* 2022. V. 12, № 6. P. 571–583.
3. *Bondar A.T., Shubina L.* Nonlinear reactions of limbic structure electrical activity in response to rhythmical photostimulation in guinea pigs // *Brain Research Bulletin.* 2018. V. 43. P. 73–82.
4. *İşcan Z., Nikulin V.V.,* 2018. Steady state visual evoked potential (SSVEP) based braincomputer interface (BCI) performance under different perturbations // *PLoS One* 13 <https://DOI.org/10.1371/journal.pone.0191673>. e0191673.
5. *Zhang Y., Guo D., Xu P., Zhang Y., Yao D.* Robust frequency recognition for SSVEP-based BCI with temporally local multivariate synchronization index // *Cogn. Neurodyn.* 2016. V. 10. P. 505–511.
6. *John Clark, Colin Yallop and Janet Fletcher.* An Introduction to Phonetics and Phonology // Blackwell Publishing, 2007.
7. *Бондарь А.Т., Федотчев А.И., Полевая С.А.* Пространственные особенности нелинейных процессов в коре головного мозга человека. // *Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях: труды VI всероссийской конференции.* 2019. Нижний Новгород, С. 49–50.
8. *Angus Silver R.* Neuronal arithmetic // *Nature reviews, Neuroscience,* V. 11. July 2010. P. 474–489.

Соотношение ритмов локальных полевых потенциалов во время развития эпилептического статуса у морской свинки

А.Т. Бондарь¹, Л.В. Шубина²

¹ Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Московская область, bondar@pbcas.ru

² Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино, Московская область, shubina.lu@gmail.com

Ритмической электрической активности нервной системы свойственно многообразие, однако она не представляет собой некий континуум, а имеет ряд дискретных уровней на низкочастотной части спектра, что позволило их классифицировать. Международной федерацией обществ электроэнцефалографии и клинической нейрофизиологии принято, в зависимости от частоты, следующее разделение ритмов: дельта (1–4 Гц), тета (4–8 Гц), альфа (9–11 Гц), beta1 (12–18 Гц), beta2 (19–30 Гц) и гамма (30–90 Гц).

В литературе существуют немногочисленные, но в то же время противоречивые попытки найти систему (закономерность) во взаимоотношениях частот этих уровней. Можно выделить три взаимоисключающих соотношения ритмов между собой.

На основе анализа литературных данных сделан вывод об экспоненциальной зависимости между центральными частотами ритмов [1], имеющей основание, равное «е». В другой работе [2] эта зависимость представляет собой экспоненциальную функцию с основанием 2. Третья гипотеза также исходит из предположения об экспоненциальной зависимости между ритмами [4], но с основанием, равным 1,6.

Отличие между вышеизложенными гипотезами заключается лишь в основании степенной функции, однако оно может носить принципиальный характер, поскольку требует различных механизмов реализации.

Целью данной работы явилось исследование соотношения ритмических компонент локальных полевых потенциалов (ЛПП) в лимбических структурах мозга морских свинок при развитии эпилептического статуса (ЭС), вызываемого конвульсантом (каиновой кислотой).

Работа была выполнена на бодрствующих морских свинках. Регистрацию локальных полевых потенциалов проводили одновременно из четырех структур мозга: медиальной септальной области (МС), гиппокампа, энторинальной коры и амигдалы (БА). В настоящей работе была использована кайновая модель височной эпилепсии. Для этого у животных вызывали эпилептический статус введением кайновой кислоты (0,4 мкг, 0,6 мг/мл) в правый боковой желудочек (рис. 1, А).

Введение морским свинкам кайновой кислоты вызывало значительный конвульсивный эпилептический статус, длящийся несколько часов. Это состояние приводит к появлению в спектре ЛПП высокоамплитудных судорожных эпизодов (пароксизмов), чередующихся с низкоамплитудной

интериктальной активностью (межпароксизмальные интервалы) (рис. 1, Б). В работе исследовались спектры межпароксизмальных интервалов на различных этапах развития ЭС (рис. 1, А, Б).

По мере развития эпилептического статуса мы наблюдаем каскад удвоений частоты ритмической активности во всех наблюдаемых структурах (рис. 2, А). Интервал между двумя тонами, частоты (или фундаментальные частоты) которых находятся в соотношении 2:1 согласно Американской национальной стандартной акустической терминологии, называют «октавой». Полученные нами соотношения между ритмами позволяют нам утверждать об *октавном* принципе строения ЛПП. Фактически каждый пик представляет собой вторую гармонику предшествующего ритма. Полученные экспериментальные данные полностью совпадают с теоретическими представлениями Климеша [2] о каскаде удвоений исходного ритма. Следовательно, частота n -го пика может определяться степенной функцией, основание которой равно двум:

$$F_n = f_0 \cdot 2^n,$$

где f_0 – частота первичного ритма, n – номер каскада удвоений.

Основываясь на октавном принципе соотношения ритмов, мы предлагаем нижеследующую операционную модель строения электрической активности мозга морской свинки. *Операционной моделью будем называть модель, в основе которой лежит конкретная операция, осуществляющая ту или иную функцию.* В качестве фундаментальной операции будем рассматривать элементарную нелинейную операцию взаимодействия между ритмами – амплитудную модуляцию, а структуру, осуществляющую эту операцию, будем называть нелинейным оператором. Амплитудная модуляция с точки зрения математики представляет собой операцию перемножения или мультипликации двух ритмов, поэтому в дальнейшем мы будем применять эти термины.

Операторы могут объединяться в последовательные цепи, образуя каскады различной сложности. Каждый элемент каскада (модуль) представляет собой рекуррентную сеть, имеющую в самом простом случае два входа и два выхода (рис. 2, Б). Эти рекуррентные сети выполняют самую простую и элементарную нелинейную операцию: амплитудную модуляцию входящих ритмических сигналов рекуррентными ритмами, возвращающимися по обратным связям.

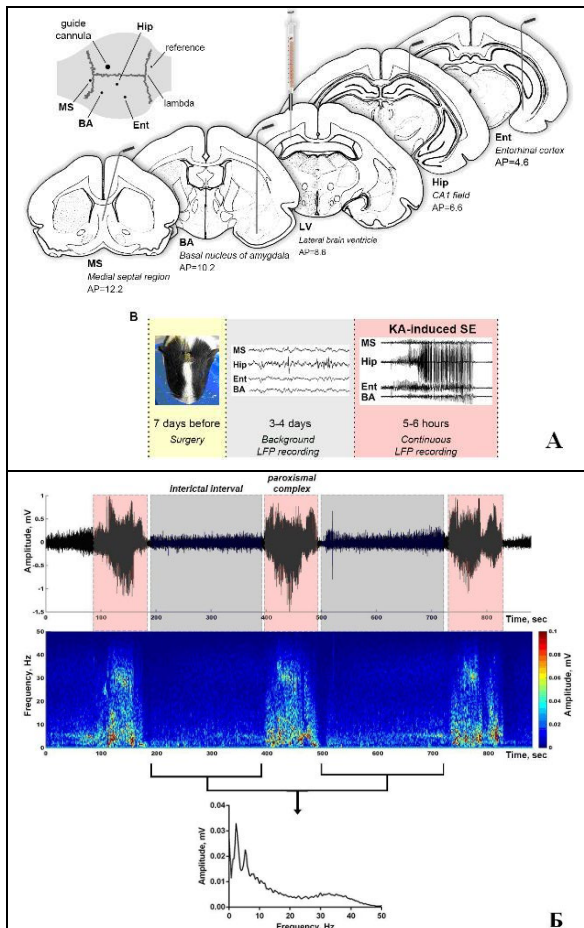


Рис. 1. Локализация электродов и канюли для введения препарата (А); схематический протокол эксперимента (Б)

Нейродинамика таких сетей является итерационной, что и определяет их свойства. На первый вход такой сети подается входной сигнал S_{in} , на второй – рекуррентный сигнал обратной связи S_{rec} , подающийся с одного из выходов сети. В основе функциональной рекуррентности может лежать инвариантное свойство анатомии нервной системы образовывать во всех структурах не только прямые, но и обратные анатомические пути (связи). На основе таких связей формируется функциональная рекуррентность, то есть движение процессов возбуждения по кольцеобразным нервным сетям. Сигнал на выходе такой системы будет зависеть от оператора взаимодействия ритмов, которым в нашем случае является операция мультипликации.

Таким образом, элементарная нелинейная операция при взаимодействии входных сигналов S_{in} и S_{rec} при первой рекурсии приводит к появлению на выходе модуля сложного сигнала, состоящего из компоненты, равной по частоте входного сигнала (1-я гармоника) и компоненте с удвоенной частотой (2-я гармоника). Каждая рекурсия будет обогащать спектр выходного сигнала дополнительной гармоникой, что может привести к образованию островолновых патологических сигналов. Механизм избегания формирования патологического поведения может быть основан на свойстве всех функциональных элементов нервных сетей

иметь определенные амплитудно-частотные характеристики.

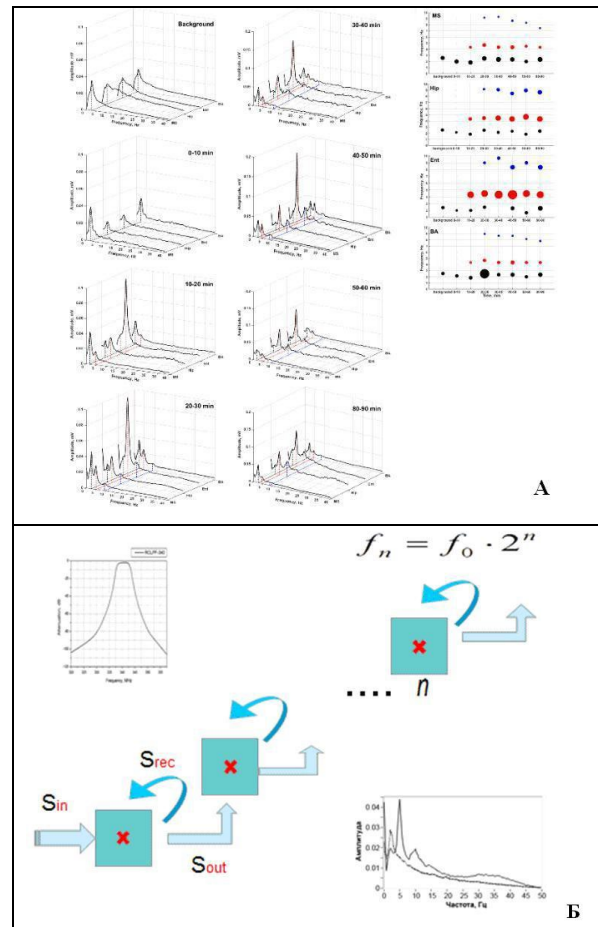


Рис. 2. Динамика спектров межпароксизмальных участков ЛПП по мере развития epileptического статуса (А). Схема каскада нелинейных операторов (Б)

Со второго выхода сигнал S_{out} подается на вход сети следующего элемента каскада. Поскольку выходы сети могут обладать определенными амплитудно-частотными характеристиками, они могут играть роль полосовых фильтров. Параметры этих фильтров определяются соотношением возбуждающих и тормозных связей в этих сетях. При определенной узости полосы пропускания таких фильтров рекуррентный выход настроен таким образом, чтобы пропускать только первую гармонику, а прямой выход в следующую сеть – только вторую, то есть с удвоенной частотой (рис. 2, Б). Далее операция вновь повторяется уже в следующей сети каскада, что приводит к удвоению частоты на выходе следующей системы. Таких сетей в каскаде может быть несколько, в результате чего каскад сгенерирует ряд ритмов:

$$f_0; f_0 \cdot 2; f_0 \cdot 4; \dots f_0 \cdot 2^n,$$

где n – число элементов каскада удвоений.

Согласно модели каждое удвоение частоты локализовано в отдельном нейросетевом модуле последовательного каскада. Это утверждение может быть подтверждено также и литературными данными, в которых показано, что первая и вторая гармоники в реакции зрительных нейронов осу-

ществляются в различных нейронных популяциях [4] и обладают разной динамикой [5].

Предложенная операционная модель может быть полезна для понимания механизмов формирования пароксизмальной активности. Эти результаты также могут найти объяснение с точки зрения предложенной нами операционной модели. В модели важную роль играет узость амплитудно-частотных характеристик сетевых выходов. Именно она обеспечивает диссоциацию выходного сигнала на первую и вторую гармонику. При развитии ЭС в первую очередь страдают тормозные процессы. Нарушение торможения может изменить электрические свойства нервных сетей, как правило, определяемых соотношением возбуждающих и тормозных процессов, что может привести к увеличению ширины пропускания выходных каналов сети. Широкополосный фильтр приведет к тому, что сигнал обратной связи S_{rec} при второй итерации будет содержать не только первую гармонику, но и гармоники более высокого порядка, то есть иметь более сложный характер. Каждая последующая итерация будет приводить к генерации новой гармоники, что будет делать сигнал все более острым, концентрирующим всю энергию ритма в определенной фазе, то есть к развитию островолновой пароксизмальной активности. В этом случае количество гармоник отражает

число итераций в данной системе, а сами гармоники не являются самостоятельными процессами, как в случае SSVP в нормальном мозге [5], а представляют собой эпифеномены, связанные с островолновой формой сигнала.

Таким образом, используя лишь фундаментальные принципы, такие как нелинейность и наличие обратных связей (рекуррентность), можно объяснить генез и феноменологию электрической активности структур мозга в норме и патологии.

Литература

1. *Buzsaki G., Draguhn A.* Neuronal oscillations in cortical networks // *Science*. 2004. V. 304. P. 1926–1929.
2. *Klimesch W.* Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information // *Trends Cogn. Sci.* 2012. V. 16, № 12. P. 606–617.
3. *Roopun A.K. et al.* Temporal interactions between cortical rhythms // *Frontiers in Neuroscience*. 2008. V. 2, № 2. P. 145–154.
4. *Bondar A., Shubina L.* The Relationship Between the Rhythmic Components of the Brain Electrical Activity During the Development of Status Epilepticus: An Operational Model of Brain Rhythms Generation // *Brain connectivity*. 2022. V. 12, № 6. P. 571–583.
5. *Bondar A., Shubina L.* Nonlinear reactions of limbic structure electrical activity in response to rhythmical photostimulation in guinea pigs // *Brain Research Bulletin*. 2018. V. 43. P. 73–82.

Возможности оценки нелинейной динамики variability сердечного ритма при индивидуальном и совместном решении задач

А.В. Варфоломеева¹, А.Г. Тищенко²

¹ ФГБОУН ВО ГАУГН, Москва, varflany@gmail.com

² ФГБУН ИП РАН, Москва, antongtishenko@gmail.com

В современных междисциплинарных исследованиях, построенных в рамках методологии системно-эволюционного подхода и универсального эволюционизма и направленных на изучение координационных отношений между индивидами, вовлекающимися в совместную деятельность для достижения общего результата, уделяется особое внимание оценке проблемы согласования составляющих индивидуального опыта. Подобное согласование может быть выражено как взаимосодействие – «...подлинная кооперация компонентов множества, усилия которых направлены на получение конечного полезного результата. А это значит, что всякий компонент может войти в систему только в том случае, если он вносит свою долю содействия в получение конечного полезного результата...» [2]. Таким образом, расширяя эту формулировку, можно определить, что достижение результатов совместной деятельности происходит через согласование индивидуально-специфичного опыта, которое проявляется в межличностной координации общеорганизменных (нейрональные и висцеральные составляющие) функциональных систем.

При исследовании способов решения текстовых задач было определено, что для возможностей исследования межличностных взаимодействий и формирования совместного опыта необходимо учитывать многомерность свойств, описывающих индивидуальный опыт [6]. Подобная многомерность должна характеризоваться не как аддитивность, происхождение которой имеет атомистические корни [4], а как неаддитивность, образованная селекцией и дифференциацией.

В настоящей работе планируется рассмотрение возможных вариантов оценки нелинейной динамики variability сердечного ритма при индивидуальном и совместном решении задач.

Оценка межличностной координации общеорганизменных функциональных систем проводится при анализе variability сердечного ритма (ВСР), поскольку чувствительность и одновременно интегративность активности сердца позволяют обосновывать гипотезы о специфичности его вхождения в разные поведенческие акты и достижения полезно-приспособительных результатов поведения [10]. Основой в анализе ВСР является выделение комплекса QRS волны электрокардиограммы, где R – точка, соответствующая пику этого комплекса, – выступает как начало и конец RR-интервалов, динамика которых обладает свойствами нелинейности, фрактальности, нестационарности, что в свою очередь позволяет вычислять

значения энтропии сердечного ритма. Такие свойства энтропии, как нелинейность и случайность, позволяют, в ситуации регистрации ЭКГ во время выполнения различных действий (таких, как функциональные пробы [7]), хирургические операции [16], а также решение сложных когнитивных задач [11]), оценить процессы реорганизации структуры опыта и рассматривать их как попадание индивидом в состояние неустойчивости или неравновесности. Среди результатов проведенных исследований обнаруживается динамика энтропии при острой алкогольной интоксикации, а также при решении задач сложного выбора, таких, как моральные дилеммы [1].

Динамические ряды кардиоинтервалов могут быть получены при анализе любых кардиографических записей: электрических, механических, ультразвуковых и т. д. [3], а процедуры для обнаружения сердцебиений включают в себя электрокардиографию, баллистокардиограммы [12] и сигнал пульсовой волны, полученный из фотоплетизмографа. При этом variability ритма сердца оценивают на основании измерений длительности интервалов R–R на ЭКГ, в которой математически (например, при помощи алгоритма Пана – Томпкинса) производят автоматическое распознавание R-зубца и формируют запись последовательности интервалов R–R. Более верным было бы исследование длительности интервалов R–R, так как именно начало зубца R и является началом нового сердечного цикла, связанного с возбуждением синусового узла. Для применения процедур анализа, помимо очистки сырой кардиограммы от артефактов, также необходимо учитывать специфику решаемых участником исследования задач, поскольку ошибки в определении маркеров приводят к ошибкам в расчете ВСР [15]. Среди наиболее распространенных и оптимальных для регистрации ВСР являются следующие условия: а) в относительном покое; б) при проведении функциональных тестов; в) в условиях обычной деятельности или при выполнении профессиональных нагрузок; г) в клинических условиях. Однако каждое из этих условий обладает определенными особенностями и, например, при решении сложных когнитивных задач требует решения проблема выделения актов, относительно которых будет проводиться анализ [5].

По результатам проведенных исследований с оценкой ВСР определено, что при межличностном взаимодействии степень координации между индивидами может быть выражена количе-

ственной оценкой – энтропией – как мерой сходства или несходства во временных интервалах между ударами сердца у двух или более индивидов [16]. Содержание этой оценки таково, что высокие значения энтропии соответствуют низкой скоординированности или синхронизации – в зависимости от дизайна исследования, а низкие значения энтропии – наоборот. При этом обозначенные проблемы при анализе ВСП для оценки межиндивидуальной координации общеорганизменных (нейрональные и висцеральные составляющие) функциональных систем у одного индивида становятся более критичными, если в анализ вовлекаются результаты взаимодействий двух и более индивидов.

Предполагается в основу протокола анализа ВСП включать оценки количества RR-интервалов от отметок (начало-конец решения задачи) с возможным применением техники аугментации (плавающего окна) для коррекции субъективного начала и конца решения, а также длительность RR-интервалов. Для анализа амплитудно-временных рядов сердечного ритма за периоды решения каждой задачи требуется вычисление значения выборочной энтропии [13], а также корреляционной размерности [14]. Выборочная энтропия выступает как оценка нерегулярности, сложности и нестационарности последовательности, в связи с чем включает вычисление отрицательного натурального логарифма условной вероятности обнаружить сходные векторы при разделении последовательности на m -мерные и $(m + 1)$ -мерные вектора. В общем виде эта процедура может быть дополнена оценкой графа вариабельности сердечного ритма [7], который может быть соотнесен по показателям корреляционной размерности (D_2 – как мера оценки фрактальной размерности D), что позволяет его соотносить с аттракторами (областью фазового пространства) и делать вывод о детерминированном хаосе (ограниченность областью фазового пространства) или

о стохастическом процессе (заполнение всего фазового пространства) [8].

Отобранные показатели используются в связи с тем, что с теоретико-методологических позиций теории динамических систем они выражают сходные характеристики последовательностей: сложность динамики, степень нерегулярности, нестационарности. Комплексное использование этих оценок с последующим анализом согласованности эффектов в их динамике позволит избежать случайных эффектов.

На рис. 1 продемонстрировано сходство графа ВСП при решении текстовых задач и при выполнении глубокого расслабления в процессе сеанса аутотренинга ($X_{cp} = 1,12$; $S = 0,085$). Проведенное сравнение носит демонстративный характер и требует дополнительной оценки, в частности в условиях межиндивидуального взаимодействия. Однако предварительное заключение может быть следующим: для графа (рис. 1, В) характерны значения показателя наибольшей экспоненты Ляпунова ($\lambda_1 > 0$), это указывает на то, что динамическая система сердечного ритма находится в неустойчивом состоянии, что может быть вызвано как детерминированным хаосом, так и стохастическим процессом [8]. Однако этот вывод делает для коротких стационарных отрезков ($n = 256$). В связи с этим, обращаясь к оценке экспоненциальной расходимости-сходимости фазовых траекторий (оцениваемых с помощью λ_1 , где расходимость при $\lambda_1 > 0$, а сходимость при $\lambda_1 < 0$) и к возможному различающемуся вкладу в ВСП периодической составляющей и недетерминированного хаоса [9], следует заключить, что возможны варианты фазовых траекторий для различающихся групп участников исследования. Эти варианты стоит рассматривать как в отношении индивидов (четыре варианта способов решения текстовых задач [6], так и для вариантов согласования при межиндивидуальном взаимодействии участников исследования с различающимися способами решения.

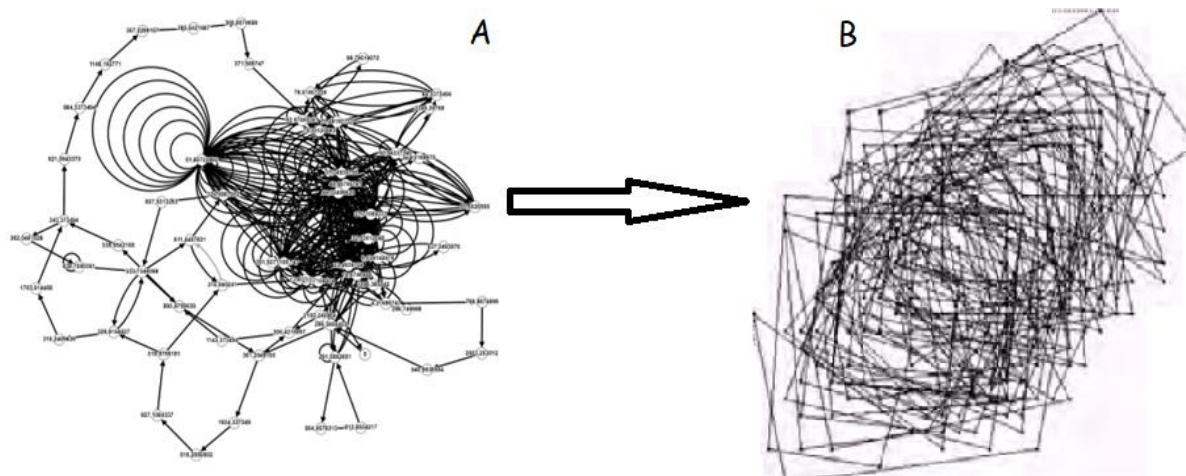


Рис. 1. Соответствие графа ВСП при решении текстовых задач (А) и при выполнении глубокого расслабления в процессе сеанса аутотренинга (В, см. [7])

Исследование выполнено при помощи гранта
Российского научного фонда № 23-18-00473.

Литература

1. Александров Ю.И., Сварник О.Е., Знаменская И.И., Колбенева М.Г., Арутюнова К.Р., Крылов А.К., Булава А.И. Регрессия как этап развития. М. : Изд. «Институт психологии РАН». 2017. 191 с.
2. Анохин П.К. Принципы системной организации функций. М. : «Наука». 1973.
3. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения // Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2001. № 3. С. 108–127.
4. Бунге М. Философия физики // М. : Изд. «Прогресс». 1975.
5. Тищенко А.Г., Апанович В.В., Созинов А.А., Цхадаиа Л.Г., Александров Ю.И. Сравнительная характеристика текстовых и игровых задач // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях–2019: труды VI Всероссийской конференции. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2019. 234 с.
6. Тищенко А.Г., Апанович В.В., Александров Ю.И. Дескрипторы способов решения текстовых задач: соотношение с индивидуально-психологическими характеристиками // Вопросы психологии. 2021. Т. 67, № 2. С. 135–147.
7. Машин В.А. Анализ вариабельности сердечного ритма с помощью метода графа // Физиология человека. 2002. Т. 28, № 4. С. 63–73.
8. Машин В.А. Связь тангенса угла наклона линии регрессии графа сердечного ритма с периодической и нелинейной динамикой ритма сердца на коротких стационарных отрезках // Биофизика. 2006. Т. 51, № 3. С. 534–538.
9. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров. М. : Мир. 1990. 340 с.
10. Bakhchina A.V., Arutyunova K.R., Sozinov A.A., Demidovsky A.V. and Alexandrov Y.I. Sample entropy of the heart rate reflects properties of the system organization of behaviour. 2018. Entropy 20:449.
11. Bakhchina A.V., Apanovich V.V., Arutyunova K.R. and Alexandrov Y.I. Analytic and Holistic Thinkers: Differences in the Dynamics of Heart Rate Complexity When Solving a Cognitive Task in Field-Dependent and Field-Independent Conditions. Front. Psychol. 2021. 12:762225.
12. Brüser C., Stadthanner K., de Waele S., Leonhardt S. Adaptive beat-to-beat heart rate estimation in ballistocardiograms // IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine : journal. 2011. V. 15, № 5. P. 778–786.
13. Richman J.S., Moorman J.R. 2000. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy // American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology 278(6), 2039–2049.
14. Tarvainen M.P., Geogiadis S., Laitio T., Lippinen J.A., Karjalainen P.A., Kaskinoro K., Scheinin H. Heart Rate Variability Dynamics During Low-Dose Propofol and exmedetomidine Anesthesia // Annals of Biomedical Engineering. 2012. V. 40, № 8. P. 1802–1813.
15. Citi L., Brown E.N., Barbieri R. A real-time automated point-process method for the detection and correction of erroneous and ectopic heartbeats // IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering: journal. 2012. V. 59, № 10. P. 2828–37.
16. Dias R.D., Zenati M.A., Stevens R., Gabany J.M., Yule S.J. Physiological synchronization and entropy as measures of team cognitive load. J Biomed Inform. 2019. Aug;96:103250.

Анализ нестационарных временных рядов в ЭЭГ-исследовании приобретения и совершенствования навыка

Д.Л. Гладилин¹, В.В. Апанович², Э.А. Арамян³, К.С. Юдаков⁴, Ю.И. Александров⁵

¹ Институт психологии РАН; МГППУ, Москва, dima.gladilin.psy@gmail.com

² Институт психологии РАН; ГАУГН, Москва, apanovitschvv@yandex.ru

³ Институт психологии РАН, Москва, aramyan.eric@gmail.com

⁴ ГАУГН, Москва, kost05062000@mail.ru

⁵ Институт психологии РАН; ГАУГН, Москва, yuraalexandrov@yandex.ru

Введение

Важным аспектом исследования процессов научения и совершенствования навыка является анализ динамических характеристик этих процессов. В нашей работе предлагается способ обработки и визуализации нестационарных временных рядов для специально сконструированного психофизиологического исследования с использованием психофизической методики по разграничению приобретения и совершенствования навыка.

С позиций системно-эволюционного подхода (СЭП) обучение можно разделить на процесс приобретения нового навыка (системогенез) и совершенствование уже имеющегося навыка (изменение межсистемных отношений) [1, 7].

Для сопоставления приобретения нового навыка и совершенствования уже имеющегося нами была выбрана и модифицирована психофизическая задача «Да-Нет» [13], позволяющая оценивать эти процессы в одинаковых единицах измерения (время ответа, результативность и т. д.) и условиях проведения исследования. В качестве оцениваемого параметра нами было выбрано время экспозиции сигналов.

Предполагаемая низкая экологическая валидность задачи позволяет говорить о слабой представленности данного навыка в структуре индивидуального опыта у субъектов, что позволяет исследовать процессы приобретения и совершенствования навыка без значительного влияния побочных переменных, связанных с прошлым опытом [10]. Также следует отметить, что при решении данной психофизической задачи возможна регистрация ЭЭГ с минимальными мышечными и глазодвигательными артефактами.

Психофизический показатель d' , в классической психофизике определяемый как показатель сенсорной чувствительности [9], был выбран нами в качестве универсальной единицы для оценки результативности.

При регистрации психофизических показателей следует нивелировать влияние таких процессов как «адаптация» и «сенсбилизация». В психофизических исследованиях данные процессы выступают в качестве побочных переменных при регистрации чувствительности. Во время конструирования нашей методики мы нивелировали влияние данных переменных.

Конструирование методики

Апробация нашей методики была разделена на два этапа:

1. Нивелирование фактора «сенсбилизации».
2. Определение исходной психометрической трудности задачи (оценка дискриминативности методики).

Фактор «сенсбилизации», традиционно понимаемый как интеграция сенсорных процессов, с позиций СЭП не был детально изучен. Для точного определения данного процесса с позиций СЭП необходимо было проведение отдельной экспериментальной серии.

Для проведения исследования было подготовлено 10 опытных участников исследования со стабильно высокими показателями d' , которым необходимо было решать психофизическую задачу «Да-Нет» с оцениваемым параметром «время предъявления сигнала» в двух условиях. В первом из них (контрольная серия) участники исследования решали только задачу «Да-Нет» по различению параметра «время предъявления сигнала». Во втором (экспериментальная серия) – тем же участникам исследования необходимо было до задачи по различению времени предъявления сигнала решать «сенсбилизующую» задачу, в качестве которой выступала идентичная первой по всем показателям, кроме оцениваемого параметра, психофизическая задача «Да-Нет». В этой предварительной задаче необходимо было различать размеры предъявляемых сигналов. Контрольные и экспериментальные условия проводились в разные дни и были контрбалансированы между участниками исследования.

Было показано, что в контрольной серии проявляется устойчивый паттерн «сенсбилизации», отсутствующий в экспериментальной серии. Исходя из данного результата, мы добавили «сенсбилизующую» задачу в дизайн исследования по изучению приобретения и совершенствования навыка.

Определение исходной психометрической трудности задачи заключалось в подборе двух уровней сложности для нивелирования фактора различной чувствительности испытуемых (в терминах классической психофизики) [9]. Было проведено исследование на 7 уровнях сложности, соответствующих величине различия между пустой и сигнальной пробами (60, 66, 70, 80, 90, 92 и

100 мс; $N = 83$). На основе этих семи уровней сложности строилось уравнение зависимости между сложностью и z-координатами и высчитывались вероятности изначального неслучайного решения задачи участниками исследования в 33% и 66%. Было получено, что данным вероятностям изначального решения задачи соответствуют сложности в 69 и 95 мс (подробнее см. в [3]).

Обработка и визуализация временных рядов

Для сопоставления процессов приобретения и совершенствования навыка в сконструированной методике нами были подготовлены несколько способов визуализации и обработки полученных данных.

После первичной обработки результатов, включающей в себя экспорт всех данных и режекцию глазодвигательных артефактов на ЭЭГ, проводилось усреднение окон, связанных с событиями потенциалов (ССП) на определенную эпоху ЭЭГ-графика. Усреднение ССП проводилось по принципу плавающего окна с эпохой усреднения в 50 проб и с шагом в 1 пробу. Для подсчета результативности решения задачи рассчитывался показатель d' по методу плавающего окна с теми же характеристиками. Таким образом строился график результативности решения задачи, в котором каждой точке графика соответствует свое окно усреднения ССП (рис. 1).



Рис. 1. Усреднение результативности и окон ССП

На основе полученных окон усреднения ССП, ввиду вариативности компонентов, строились тепловые карты для визуализации, анализа и дальнейшего экспорта амплитуд компонентов [12].

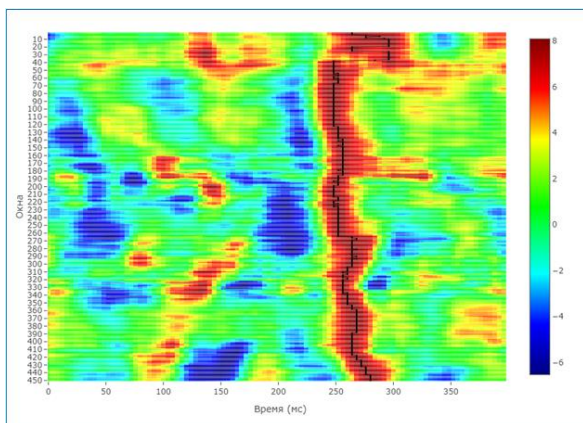


Рис. 2. Тепловая карта усреднений окон ССП

На рис. 2 отображен пример такой тепловой карты: по абсциссе отображено время (в мс), а по

ординате усредненные окна потенциалов. С правой стороны графика обозначена легенда цвета, соответствующая мгновенным амплитудам.

Тепловая карта позволяет одновременно отображать все окна ССП, анализировать вариативность пиков, экспортировать амплитуды и латенции пиков.

При дальнейшем анализе peak-to-peak высчитывались перепады амплитуды между всеми соседними пиками.

При обработке временных рядов в литературе описываются методы, базирующиеся на анализе стационарных временных рядах, однако ни показатели результативности, ни показатели амплитуд и латенций компонентов ССП характеристикой стационарности не обладают [7]. Для решения этой проблемы нами было предложено два метода.

Для сопоставления результативности с амплитудными значениями компонентов ССП нами был подобран метод подсчета ковариаций по 50 точкам с шагом в одну пробу. Данный способ обработки был нами апробирован на модельных данных (рис. 3) [8].

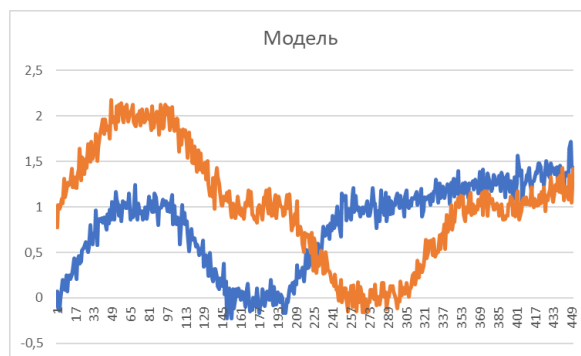


Рис. 3. Модельные данные плавающих ковариаций

В модельные данные были заложены определенные эпохи: резкий рост по двум графикам с 1 по 50 пробу; плато с 51 по 100, с 151 по 200, с 251 по 300 и с 351 по 400 пробу; резкое падение по двум графикам с 101 по 150 пробу; разнонаправленная динамика с 201 по 250 пробу; резкий рост по одному графику и плавный рост по другому с 301 по 350 пробу; плавный рост по двум графикам с 401 по 450 пробу.



Рис. 4. Плавающее окно ковариаций на модельных данных

Заложенные в модель взаимосвязи с резкой однонаправленной динамикой на графике отображаются высокими показателями ковариаций, от-

существование взаимосвязи, выраженное в виде плато, отображается околонулевыми показателями ковариации, разнонаправленная взаимосвязь отображается отрицательными значениями ковариации, а слабо выраженная взаимосвязь отображается низкими значениями ковариации (рис. 4). Таким образом, этот метод позволяет сопоставлять динамику двух временных рядов.

Стоит отметить, что традиционно используемый коэффициент корреляции Пирсона нормируется по единицам стандартного отклонения, и из-за этого при его проверке было отлучено, что он не учитывает величину изменений при слабо выраженной взаимосвязи и отображает ее в виде высоких показателей корреляции.

При дальнейшем анализе плавающих ковариаций также учитывалась разница между z-координатами d' и амплитудами компонентов для дополнительного учета несоответствий значений во временных рядах (рис. 5).

Этот метод позволяет говорить о сопоставлении низких/высоких значений в том или ином окне анализа.



Рис. 5. Разница между d' и амплитудой

Помимо обработки результатов, направленных на определение связи ССП с результативностью, нами были обнаружены сходства и различия между отведениями ЭЭГ, которые мы проверяли при помощи кластерного анализа по методу Уорда (Ward's method) и k-means (рис. 6) [11]. Данные считались как на отдельных испытуемых, так и по всей выборке одновременно.

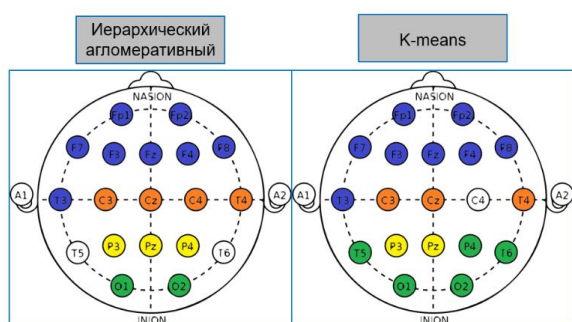


Рис. 6. Кластеризация отведений

Было показано, что по иерархическому агломеративному способу кластерного анализа методом Уорда выделяется стабильное двухкластерное и четырехкластерное решение. При сопоставлении данных иерархического анализа с k-means было получено, что двухкластерное решение повторяется в 97,1%, а четырехкластерное решение повторяется в 70,3% случаев. Также межиндивидуальная воспроизводимость двухкластерного решения составила 96,8%. Делается вывод о том, что двух-

кластерное решение разделения отведений на *front* (Fp, F, C отведения) и *back* (P и O отведения) наиболее точно группирует проявляющиеся на ССП паттерны. Пример различия паттернов ССП продемонстрирован на рис. 7.

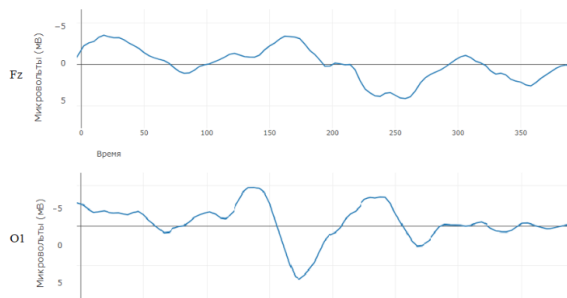


Рис. 7. ССП паттерн на O1 и Fz

Применение подобного метода не для статических, а для динамических рядов также позволит получать дополнительную информацию о процессах приобретения и совершенствования навыка. С помощью такого подхода возможно будет проводить проверку изменчивости кластеров отведений в ходе решения задачи (на примере плавающего окна с описанными выше характеристиками).

Первичные результаты, полученные с помощью описанных нами методов, продемонстрировали их пригодность для оценки соответствия нестационарных временных рядов физиологических и поведенческих показателей [2, 4, 5, 6, 8, 11].

Заключение

Нами была апробирована психофизическая методика для проведения психофизиологического исследования и сконструирован дизайн исследования по разграничению процессов приобретения нового навыка и совершенствованию уже имеющегося навыка.

Подготовлен комплекс методов анализа сопоставления динамики в двух (и более) нестационарных рядах, позволяющий визуализировать данные в виде тепловых карт и проводить статистическую обработку данных в динамике при помощи ковариационного анализа с плавающим окном и при помощи оценки несоответствия нормированных значений во временных рядах.

Разрабатываются альтернативные методы обработки данных, помимо подготовленных, такие как кластеризация отведений в динамике, кластеризация пиков ССП.

Исследование было проведено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ 0138-2023-0002).

Литература

1. Александров Ю.И. Научение и память: традиционный и системный подходы // Журн. высшей нервной деят. 2005. Т. 55, вып. 62. С. 842–860.
2. Апанович В.В., Арамян Э.А., Гладилин Д.Л., Юдаков К.С., Александров Ю.И. Динамика мозгового обеспечения процесса приобретения нового навыка при решении психофизической задачи // XVIII Международный междисциплинарный конгресс «Нейронаука для

медицины и психологии», 30 мая–10 июня 2022 года. Судак, 2021. С. 56–57.

3. *Апанович В.В., Арамян Э.А., Гладиллин Д.Л., Юдаков К.С., Карпов С.А., Александров Ю.И.* Разработка и апробация психофизической методики исследования приобретения и совершенствования навыка // Экспериментальная психология, 2022.

4. *Апанович В.В., Юдаков К.С., Гладиллин Д.Л., Арамян Э.А., Александров Ю.И.* Адаптация психофизической методики «Да/Нет» для психофизиологического исследования процессов приобретения и автоматизации навыка // Материалы IX Международной конференции молодых ученых «Психология – наука будущего». 18–19 ноября 2021 года. Москва, 2021. С. 15–19.

5. *Арамян Э.А.* Межсистемные отношения процесса научения при различении коротких интервалов времени: Дис. ... психол. наук / Арамян Эрик Арамович. Москва, 2021. 65 с.

6. *Арамян Э.А., Гладиллин Д.Л., Юдаков К.С., Апанович В.В.* Пилотное исследование ЭЭГ-потенциалов при обучении навыку различения коротких интервалов времени // Материалы IX Международной конференции молодых ученых «Психология – наука будущего». 18–19 ноября 2021 года. Москва, 2021. С. 19–23.

7. *Безденежных Б.Н.* Системная эквивалентность мозговых потенциалов P300 и P600 в задачах сенсомоторного выбора и категоризации слов // Психологический журнал. 2015. Том 36. № 5. С. 64–74.

8. *Гладиллин Д.Л.* Динамика системных процессов мозговой активности при приобретении навыка различения коротких интервалов времени: Магистерская диссертация. – 2022.

9. *Забродин Ю.М., Пахомов А.П., Шаповалов В.И.* Взаимосвязь эффективности обнаружения сигнала // В сб. «Психофизика сенсорных и сенсомоторных процессов» / ред. Ю.М. Забродин. – Москва : Наука, 1984.

10. *Пономарёв Я.А.* Психология творчества. Москва : Наука, 1976.

11. *Юдаков К.С.* Анализ компонентов, связанных с событием потенциалов при решении задачи различения коротких интервалов времени. Выпускная квалификационная работа. – 2022.

12. *Arnaud Delorme et al.* Grand average ERP-image plotting and statistics: A method for comparing variability in event-related single-trial EEG activities across subjects and conditions. 2015.

13. *Green D.M., Swets J.A.* Signal detection theory and psychophysics. N.Y.: Wiley, 1966.

Упрощенные модели для описания многозадачных режимов в живых распознающих системах

А.А. Головина¹, В.Г. Яхно^{1,2}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

² Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, yakhno@ipfran.ru

В данной работе рассмотрены динамические режимы, адекватные поведению живой системы. Существует несколько уровней представления особенностей динамических режимов восприятия и реагирования живых систем. В зависимости от решаемых задач в конкретной области функционирования сенсорные сигналы могут быть описаны с помощью упрощенных (редуцированных) базовых моделей распознавания и принятия решений, которые обычно выводятся из моделей, аналогичных схемам П.К. Анохина.

Модули разных уровней в иерархических модельных архитектурах собираются в единую функциональную систему таким образом, чтобы можно было достигать поставленных перед системой целей. Кроме того, в живых системах имеются модули управления, которые обеспечивают переключение различных, важных для них целей. Уровней много, но жизненный опыт любой системы состоит в том, что создаются стереотипные связи между определёнными состояниями живой системы. Для различных уровней выбираются свои наборы аксиом, из которых следует широкий спектр возможных динамических процессов функционирования системы. Важно выбрать наиболее универсальные переменные, позволяющие понимать смысл выполняемых операций на разных уровнях описания живого. Формируются разнообразные функциональные системы, в которых обработка сигналов определяется приоритетами в иерархических уровнях, например, использование представлений об обобщенных средствах управления в социальных системах. Уровни связываются в некоторые иерархии, что является алгоритмами функциональных систем.

Для качественного описания механизмов переключения между динамическими режимами функционирования живых систем, в предоставленной средой для этих систем ситуаций (эмоциональных или энергетических условий), используем наиболее простую базовую модель из двух балансных уравнений. Для данной системы строится двухмерное фазовое пространство, позволяющее отслеживать характерные изменения «нуль-изоклин» системы в зависимости от управляющих параметров. Рассматривается поведение траекторий изображающих точек, и наглядно демонстрируются основные режимы переходных процессов в развивающейся системе:

$$\frac{dk_1}{dt} = Y_1(t) \left(-\frac{k_1}{\tau_{2k_1}} + \frac{1}{\tau_{1k_1}} F_0[-\tau_{10} + \gamma_{11}k_1 - \gamma_{12}k_2] \right), \quad (1)$$

$$\frac{dk_2}{dt} = Y_2(t) \left(-\frac{k_2}{\tau_{2k_2}} + \frac{1}{\tau_{1k_2}} F_0[-\tau_{20} + \gamma_{22}k_2 - \gamma_{21}k_1] \right), \quad (2)$$

где k_1 и k_2 – количество инструментальных алгоритмов (и связанных с ними когнитивных фильтров); τ_{1ki} – характерное время освоения; τ_{2ki} – характерное время забывания; $F_0 []$ – ступенчатообразные функции, крутизна которых характеризует разброс величин порогов около усредненных значений; γ_{ij} – весовые коэффициенты взаимной связи между подсистемами; τ_i – порог запуска алгоритмов обучения i -й области деятельности; $Y_2(t)$ – управляющий модуль, заданный с помощью непрерывных функций.

Важные параметры, связанные с эмоциональными, энергетическими и стрессовыми состояниями развивающегося субъекта, в рамках данного рассмотрения будем считать постоянными, но разными в зависимости от этапов функционирования самого субъекта.

Для наглядной демонстрации реализуемых режимов в системе было построено двухмерное фазовое пространство (рис. 1). Уравнения для плоскостей нуль – изоклин были взяты из системы дифференциальных уравнений (1)–(2).

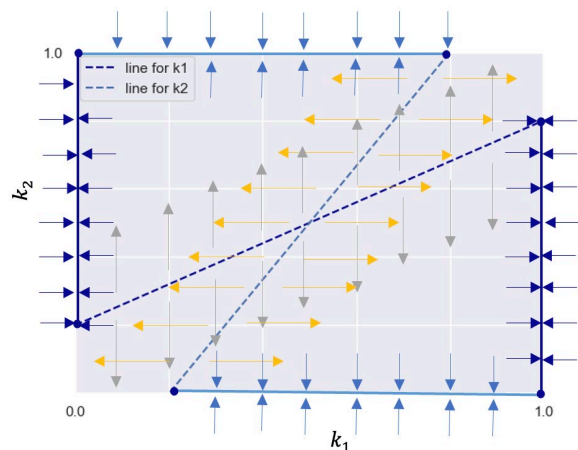


Рис. 1. Двухмерное фазовое пространство, в котором отражена вся динамика системы

В вычислительных экспериментах решение вышеуказанных систем уравнений производилось численным методом Рунге – Кутты 4-го порядка с шагом интегрирования, равным 0,01.

Анализ возможных переходных процессов в упрощенной модели

Рассмотрим примеры расположения плоскостей нуль – изоклин и траектории изображающих

точек. Для наглядности неустойчивые нуль–изоклины изображены пунктиром. На рис. 2–5 приведены типы функциональных (эмоционально-энергетических) состояний.

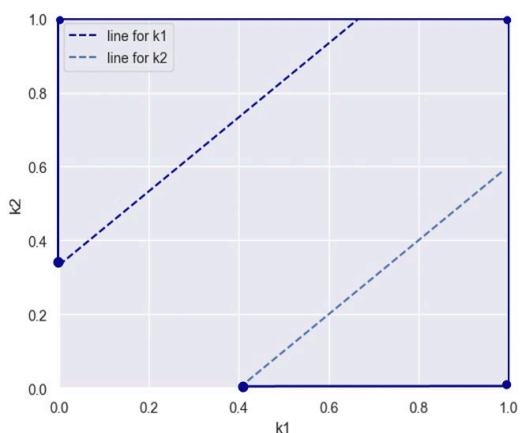


Рис. 2. Оптимальное расположение неустойчивых изоклин с зоной, где отсутствуют пороги для двухвариантных режимов развития

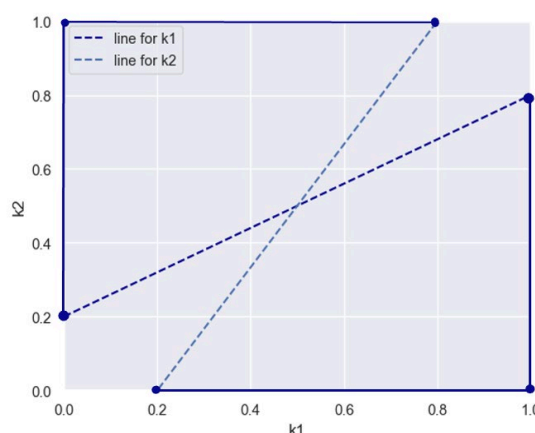


Рис. 3. Ухудшенный вариант с верхними порогами в зоне, где реализуются двухвариантные режимы развития

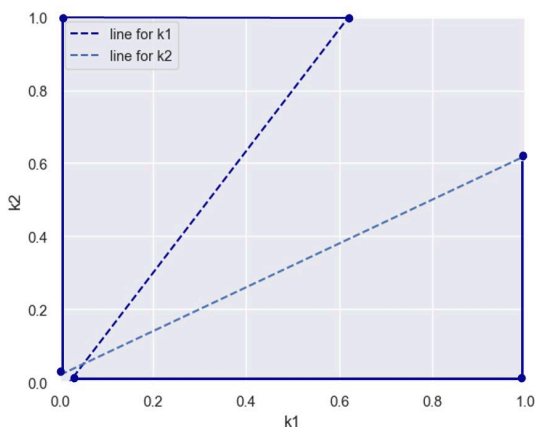


Рис. 4. Оптимальный режим с малыми порогами для запуска процессов двухвариантных режимов развития

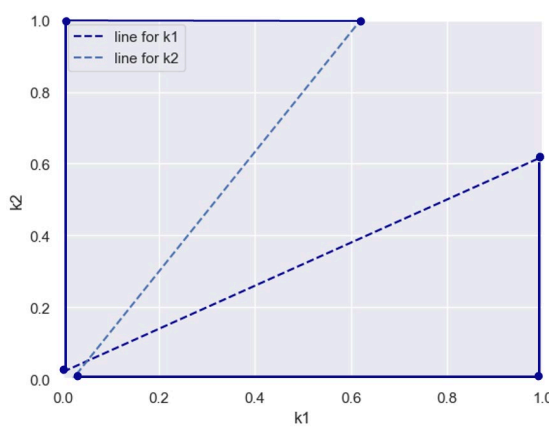


Рис. 5. «Депрессивное» состояние, ограничивающее двухвариантные режимы развития

Рисунки 6–9 иллюстрируют переходные режимы состояний системы.

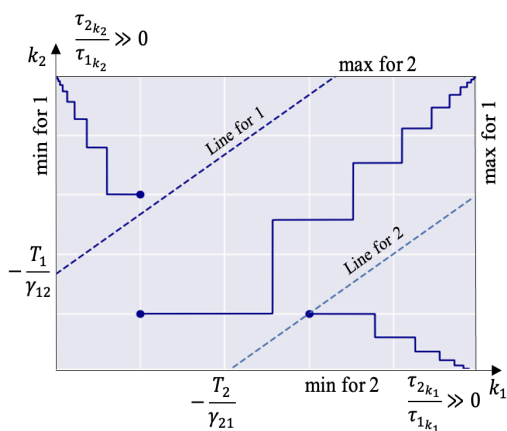


Рис. 6. Примеры изображающей точки (k_1, k_2) в случае T_1 и T_2 меньше нуля. Этапы, связанные с выполнением операций по алгоритмам 1-й функциональной системы, представлены горизонтальными линиями; вертикальные линии демонстрируют изменения состояний системы в соответствии с алгоритмами 2-й функциональной системы. Пунктирными линиями изображены пороги переключения для k_1 и k_2

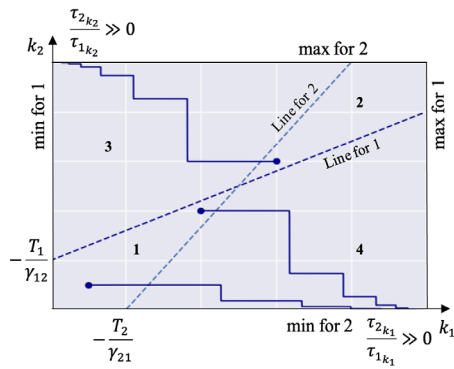


Рис. 7. Параметры системы подобраны таким образом, что в зоне 1 возможно развитие двух видов поведения; в зоне 2 оба поведения тормозятся; в зоне 3 возможен только второй вид поведения; в зоне 4 возможен только первый вид поведения. Пунктирными линиями изображены пороги переключения для k_1 и k_2

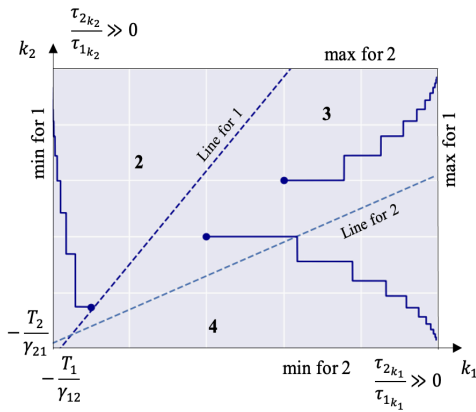


Рис. 8. В случае T_1 и T_2 больше нуля. Параметры системы подобраны таким образом, что в зоне 1 оба поведения тормозятся; в зоне 2 возможен только 2-й вид поведения; в зоне 3 возможно развитие двух видов поведения; в зоне 4 возможен только 1-й вид поведения. Пунктирными линиями изображены пороги переключения для k_1 и k_2

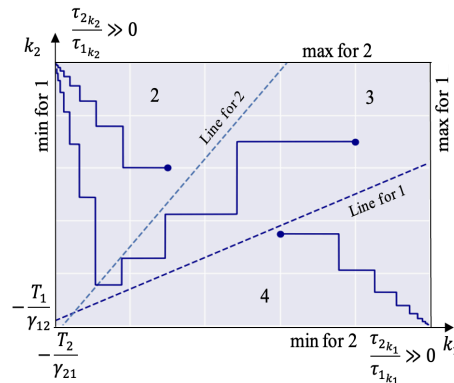


Рис. 9. В случае T_1 и T_2 меньше нуля. Параметры системы подобраны таким образом, что в зоне 1 оба поведения развиваются; в зоне 2 возможен только 2-й вид поведения; в зоне 3 оба поведения тормозятся; в зоне 4 возможен только 1-й вид поведения. Пунктирными линиями изображены пороги переключения для k_1 и k_2

Таким образом, полученная упрощенная базовая модель демонстрирует возможность адекватного описания процессов переключения между двумя режимами функционирования, которые интересны живой системе.

Отметим, что проведенное рассмотрение можно отнести к формированию элементов «смыслового», формализованного языка описания для тех переключений, которые живые системы могут осуществлять в процессах выбора ими многовариантных путей решения поставленных перед ними ситуативных проблем.

Литература

1. *Yakhno V., Parin S., Poleyaya S., Nuidel I. and Shemagina O.* Who Says Formalized Models are Appropriate for Describing Living Systems? *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research : IV Selected Papers from the XXII International Conference on Neuroinformatics*, October 12–16, 2020. Moscow, Russia. P. 10–33. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-60577-3>.

2. *Alexandrova N.Sh., Antonets V.A., Kuzenkov O.A., Nuidel I.V., Shemagina O.V., Yakhno V.G.* Bilingualism as an Unstable State: *Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics*, Series: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021. Vol. 1358. P. 359–367. DOI: 10.1007/978-3-030-71637-0_41.

Моделирование некоторых зрительных иллюзий на базе нейросетевых алгоритмов

И.А. Горбунов, А.Н. Мамаев

Санкт-Петербургский государственный университет, i.a.gorbunov@spbu.ru; a.n.mamaev@spbu.ru

Одним из важных феноменов психологии восприятия являются иллюзии. Для каждой из иллюзий существует множество попыток описания механизмов, являющихся их причиной, как физиологических, так и психологических. Однако описательные модели, которые зачастую применяются для объяснения, обладают недостаточной убедительностью, так как неоднозначно описывают данный механизм и не позволяют воспроизвести данный эффект на уровне генеративной модели.

Мы предлагаем использование генеративных нейросетевых моделей для проверки гипотез о нейрофизиологических механизмах психических явлений, например, таких как иллюзии [1]. В процессе обучения такая модель функционирует как испытуемый в эксперименте, выполняя те же функции, что даны в инструкции испытуемому, или предварительно обучается на материале, по тем или иным параметрам идентичным с входными данными, поступающими на сенсорные входы человека, а потом выполняет экспериментальные задания, например [2, 3, 6, 7].

В данной работе мы рассмотрим механизмы двух иллюзий, сильно отличающихся между собой по своим параметрам, причинам и возможным механизмам. Это иллюзия установки [8, 2], изучавшаяся в школе Узнадзе, и иллюзия Мюллера-Лайера [5, 9].

Иллюзия установки возникает при систематическом повторении предъявления двух стимулов с одинаковым соотношением размеров (например, кругов слева меньше – справа больше), рис. 1. Такое повторение называется «фиксацией установки».

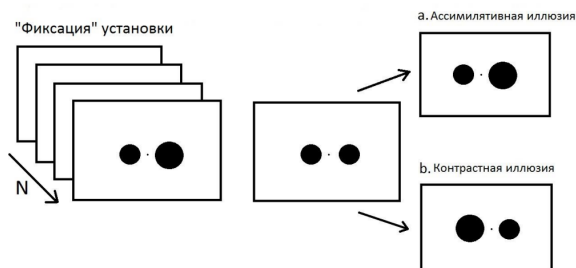


Рис. 1. Процедура формирования (фиксации) и измерения иллюзии установки

Измерение иллюзии – это предъявление одинаковых по размеру объектов и предложение испытуемому сравнить их. При этом многим испытуемым круги кажутся неравными. Неравенство объектов может быть ассимилятивным или противоположным ему – контрастным, но при этом довольно устойчивым.

При изучении научных работ по этой иллюзии можно предположить, что ассимилятивная иллюзия

чаще возникает при малом количестве фиксационных предъявлений, а контрастная при большом, хотя ранее экспериментов, проверяющих это, не проводилось. Исследование влияния количества предъявлений на фиксационной фазе и размеров отличий кругов на тип иллюзии проводилось в рамках выпускной квалификационной работы М.А. Дубовой [2] (научный руководитель И.А. Горбунов).

В данном исследовании было подтверждено, что при увеличении количества предъявлений фиксационной ассимилятивная иллюзия меняется на контрастную.

Для объяснения возникновения двух типов иллюзии можно предположить, что при принятии решения о соотношении величин кругов могут играть разные роли две системы научения – имплицитная и эксплицитная [3]. Модели их архитектуры приведены на рис. 2, где слева представлена эксплицитная, а справа – имплицитная системы.

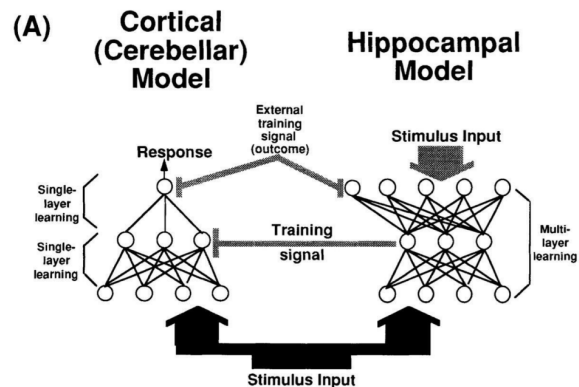


Рис. 2. Иллюстрация нейронных архитектур двух систем научения. Взято из [3]

Различия заключаются в том, что при имплицитном научении в первую очередь создается классификация событий, в процессе которой формируется множество нейронов-детекторов, реагирующих на появление каждого события, в то время как эксплицитное научение фиксировано на конечном результате – действии, кодируемом конкретным нейроном, и его активация отражает обычно моторный ответ, сила которого важна для успешного решения.

Мы предположили, что при малом количестве предъявлений фиксационной установки в первую очередь включается эксплицитное научение, которое обычно активнее действует при сильном влиянии инструкции в начале эксперимента, а при более часто повторяющейся фиксационной и успешно повторяющемся выполнении инструкции включается механизм appetentного поведения, в котором

большую роль играет имплицитная система научения.

При моделировании мы обучали нейронные сети двух предложенных архитектур. На вход обоих типов сетей подавалось соотношение размеров двух фигур. Разные выходные нейроны (7 нейронов) имплицитной архитектуры обучались активироваться при разном соотношении поступающих на вход кругов (левый сильно, средне, слабо больше правого, левый и правый равны, правый сильно, средне, слабо больше левого, рис. 3).

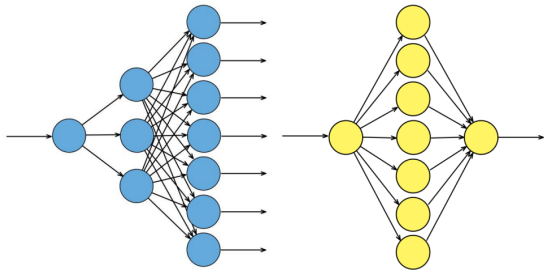


Рис. 3. Различные архитектуры обучаемых сетей: слева – имплицитная (классификатор), справа – эксплицитная (регрессия)

Один выходной нейрон эксплицитной архитектуры на выходе должен был выдавать степень соотношения двух фигур, поступившую на вход.

Алгоритм обучения состоял в следующем:

1. Нейросеть данной архитектуры обучалась правильно оценивать/классифицировать соотношение кругов, подаваемое на вход.
2. Тестирование точности оценки.
3. Фаза фиксации установки – предъявления неравных кругов со схожим соотношением размеров.
4. Тестирование иллюзии – вычисление отклонений от решения о равенстве кругов при подаче на вход нулевого различия.

В результате гипотеза подтвердилась. При обучении классификации (имплицитная архитектура) ошибки концентрировались в области контрастной иллюзии 96% из 48 из 50 проб обучений нейросети. При обучении регрессии (эксплицитная архитектура) ошибки смещались в область ассимилятивной иллюзии (рис. 4).

Следующая иллюзия – Мюллера-Лайера – известна с 1889 года. Существовало большое количество интерпретаций механизмов этой иллюзии. Множество концепций связывают механизмы этого явления со спецификой пространственного восприятия глубины. Также существуют концепции, рассматривающие психофизиологические механизмы иллюзии через оценку работы различных мозговых структур, соотношение рецептивных полей и т. п. [5, 6].

Мы предприняли попытку создания генеративной модели иллюзии через моделирование и обучение нейронных сетей. Подобный метод исследования уже использовался в работе [9], однако использованная в данном исследовании модель, хоть и близка по структуре к зрительной коре,

сложна для численного экспериментирования и оценки ее деятельности. К тому же данная модель обучалась на 3d-объектах, то есть на ее вход подавались только 2d-объекты и оценка данной нейросети имела функции классификатора: длинный/короткий объект.

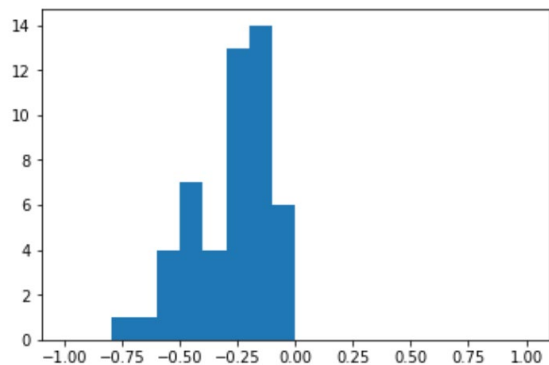


Рис. 4. Смещение частот результатов сравнений одинаковых кругов в сторону отрицательных соотношений, соответствующих решению ассимилятивной иллюзии

Для моделирования иллюзии мы использовали многослойный перцептрон, состоящий из 3 конволюционных слоев (подобие рецептивных полей в зрительном анализаторе) и 3 полносвязных слоев, заканчивающихся 1 нейроном выходного слоя. Входной слой соответствует размеру поступающих плоских изображений (рис. 5).

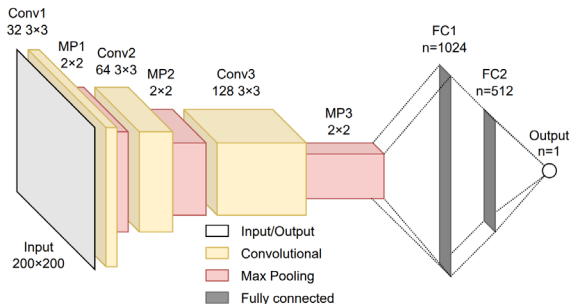


Рис. 5. Схема модели нейронной сети для оценки высоты 3d-объектов

На вход подавались сгенерированные проекции на плоскость трехмерных объектов (прямоугольных параллелепипедов, похожих на здания) под разными углами проекции и с разных расстояний (некоторые изнутри). Такая проекция обычно попадает на сетчатку глаза (рис. 6) при взгляде на угол дома. Угловые вертикальные грани объектов на двумерной проекции имеют вид стрелок с обращенным наружу или внутрь оперением. После активации сети входным изображением выходной нейрон должен был выдавать активацию, равную условной высоте подаваемой на вход фигуры. Нейронная сеть обучалась методом обратного распространения ошибки, которая вычислялась как разница между активацией выходного нейрона и высоты фигуры [7].

В конце обучения при уверенном распознавании высоты на вход подавались 4 изображения оперенных линий иллюзии Мюллера-Лайера (рис. 7).

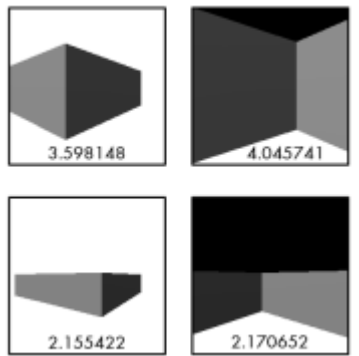


Рис. 6. Примеры изображений, подаваемых на входной слой нейросети и условные высоты объектов, изображенных на рисунках

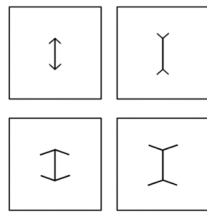


Рис. 7. Изображения стрелок, подаваемые на вход после обучения

В каждой паре одно оперение на стрелке было шире (угол наклона оперения и линии более тупой), а другая уже (угол острый). Результаты по каждой из стрелок, выдаваемые на выходном нейроне, записывались в таблицу.

Было обучено 30 нейронных сетей на случайных выборках изображений. Дисперсионным анализом (рис. 8) и байесовским моделированием были получены оценки достоверности влияния факторов направления оперения и угла наклона оперения на оцениваемую высоту. Все они были достоверны.

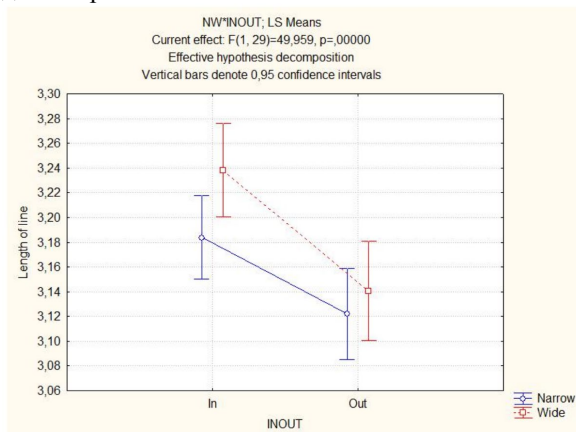


Рис. 8. Различия между оценками высоты стрелок нейронными сетями под влиянием факторов: направление и ширина стрелок

Полученные результаты показывают, что изучение различных психологических феноменов путем моделирования нейронных сетей может быть успешным [1]. В дальнейшем планируется оценка полученных эффектов, в частности ширины (угла наклона) стрелки на величину иллюзии на выборке реальных испытуемых, особенно проживающих в разных типах местности с высокой и малоэтажной застройкой. В зависимости от модели их иллюзии должны различаться по величине.

Итоги данного исследования показывают, что многие зрительные иллюзии возникают как следствие научения преобразованию двумерных изображений, поступающих на сетчатку глаза в 3d-модель окружающей среды мозговой нейронной сетью. Однако при этом преобразовании двумерных изображений информации о реальном объекте часто не хватает, что вынуждает нервную систему интерпретировать максимально вероятный результат, который в некоторых случаях не является верным.

Литература

1. Горбунов И.А. Нейродинамическая система как основа методологии моделирования ментальных ресурсов человека / И. А. Горбунов // Ментальные ресурсы личности: теоретические и прикладные исследования: материалы третьего международного симпозиума, Москва, 20–21 октября 2016 года. М. : Институт психологии РАН, 2016. С. 309–314.
2. Дубова М.А. Моделирование иллюзий установки в рамках рационального и нейросетевого подходов: вкр. СПбГУ., Бакалавриат, факультет психологии. СПб. 2019.
3. Gluck M.A. & Myers C.E. Hippocampal mediation of stimulus representation: A computational theory. Hippocampus. 1993. 3(4). P. 491–516.
4. Gorbunov I. et al. Using the neural model of the person's semantic space to reveal the occurred with him events / I. Gorbunov, I. Pershin, M. Zainutdinov, V. Koval // IMCIC 2019 – 10th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics, Proceedings, Orlando, FL. 2019. P. 164–165.
5. Bermond B., Van Heerden J. The Müller-Lyer illusion explained and its theoretical importance reconsidered // Biology and Philosophy. 1996. T. 11, № 3. С. 321–338.
6. Hohwy J. The predictive mind. Oxford University Press. 2013.
7. Mamaev A.N. et al. The Müller-Lyer illusion in CNN trained for 3D object height estimation / A.N. Mamaev, I.A. Gorbunov // Neurotechnologies : Collective monograph. St. Petersburg : ООО «Издательство BBM», 2021. P. 159–167.
8. Uznadze D.N. The psychology of set Consultants bureau. New York, 1966.
9. Zeman A. et al. The Müller-Lyer illusion in a computational model of biological object recognition // Plos One. 2013. T. 8, № 2. С. e56126.

Внутренняя размерность естественного языка

В.А. Громов, Н.С. Бородин

Высшая школа экономики, Москва, stroller@rambler.ru

Введение

Работа В.А. Громова и А.С. Мигриной [7] позволила взглянуть на естественный язык как на единую систему, относящуюся к классу самоорганизованно критичных систем. В настоящей работе предпринимается попытка исследовать геометрические свойства данной системы.

Появление и широкое распространение методов представления слов и n -грамм естественного языка в виде действительных векторов (*embeddings* в англоязычной литературе) в задачах машинного обучения позволило поставить вопрос об определении внутренней размерности множеств слов и n -грамм данного естественного языка. Забегая вперед, можно отметить, что, согласно результатам экспериментов, указанные множества точек обладают нецелыми (фрактальными) размерностями, что вынудило авторов настоящего исследования отказаться от напрашивающегося термина «языковое многообразие» в пользу понятия «языковая фрактальная структура». В связи с этим поставленный вопрос представляется авторам важным как с теоретической, так и с практической точек зрения: с одной стороны, вводится в рассмотрение принципиально новый математический объект – языковая фрактальная структура – и устанавливаются ее простейшие свойства; с другой стороны, ставится под сомнение целесообразность использования при обработке естественных языков больших векторов вложений (тысячи и десятки тысяч компонент), порождаемых, прежде всего, глубокими нейросетевыми моделями (ELMO [10], BERT [5], GPT-3 [4] и т. п.).

Все вычислительные эксперименты, направленные на изучение поставленного вопроса, проводились над корпусами национальной литературы русского и английского языков. Использование именно литературных текстов обусловлено тем, что авторы полагают (может быть, несколько старомодно), что национальная литература является ядром соответствующего языка. Выбор для сравнительного анализа русского и английского языков также не случаен. Оба языка насчитывают значительные количества текстов в корпусах. Вместе с тем они разительно различаются внутренне: в русском языке семантику формируют флективные структуры, и зачастую порядок слов в предложении неважен; английский, напротив, в современной лингвистической типологии ближе к изолирующим языкам [13] и, за редкими исключениями, требует написания слов в строго определенном порядке [12].

Постановка задачи:

▪ для заданного множества текстов естественного языка $\mathfrak{Z} = (\Omega_1, \dots, \Omega_N)$ необходимо по-

строить множества $\mathfrak{X}_n(d), n = 1 \dots N, d = 1 \dots D$. Здесь d – размерность пространства вложения; n – число слов в рассматриваемых n -граммах. При этом предполагается, что множество текстов \mathfrak{Z} представляет собой репрезентативную выборку текстов, написанных на соответствующем естественном языке;

▪ для данного $n = k$ по множествам $\mathfrak{X}_k(d), d = 1 \dots D$ определить внутреннюю размерность множества k -грамм соответствующего естественного языка $k^* = f_i(\{\mathfrak{X}_k(d)\})$ с использованием различных подходов f_i ;

▪ проверить гипотезу о фрактальности с помощью тех подходов f_i , которые позволяют получить нецелые значения k^* (размерность Хаусдорфа).

Таким образом, при выборе методов определения внутренней размерности авторы руководствовались следующими соображениями: во-первых, необходимо применять методы, опирающиеся на как можно более разнообразные математические идеи и концепции – чтобы обеспечить робастность полученных результатов; во-вторых, приоритет должен отдаваться тем методам, которые предоставляют возможность установки факта фрактальности рассматриваемого множества.

Численные методы оценки размерности

Для построения множеств точек $\mathfrak{X}_n(d)$ по набору текстов естественного языка \mathfrak{Z} были заимствованы идеи из подхода латентно-семантического анализа [3].

Контексту \mathfrak{Z} и множеству слов $\mathfrak{X} = (\lambda_1, \dots, \lambda_M)$, входящих в этот контекст, в соответствии ставится матрица $W = (w_{ij})$, каждый элемент которой задан как:

$$w_{i,j} = (1 - \varepsilon_i) \frac{n_{i,j}}{\sum_{i' \in \Omega_j} n_{i',j}}, \quad (1)$$

где $n_{i,j}$ – количество вхождений слова λ_i в текст Ω_j , а ε_i – нормализованная энтропия слова λ_i в \mathfrak{X} :

$$\varepsilon_i = -\frac{1}{\log N} \sum_{j=1}^N \frac{n_{i,j}}{\tau_i} \log \frac{n_{i,j}}{\tau_i}, \quad (2)$$

$$\tau_i = \sum_{j=1}^N n_{i,j}. \quad (3)$$

Таким образом, наибольшие значения матрицы W соответствуют словам, часто встречающимся в конкретном тексте, но не характерным для остальных членов контекста.

К полученной матрице применяется сингулярное разложение (SVD) [3]:

$$W \simeq W' = UAV^T, \quad (4)$$

где U и V^T – прямоугольные матрицы $M \times d$ и $d \times N$ соответственно; A – диагональная матрица $d \times d$, элементы которой (сингулярные числа) отсортированы на главной диагонали в порядке убывания. Здесь d является гиперпараметром, определяющим объем сохраняемой информации для восстановления матрицы W' , наиболее приближенной по норме Фробениуса к оригинальной W . Непосредственно для расчета SVD использовалась Python-реализация алгоритма Голуба – Кахана – Ланцоша [6]. Строки полученной в результате применения алгоритма матрицы U представляют собой векторы вложений слов \mathbb{X} заданной размерности d .

Выбор подхода, основанного на сингулярном разложении, обусловлен наличием одной особенности: после завершения расчетов для некоторого d_1 становится возможным эффективное вычисление вложений для любого $d_2 < d_1$ путем взятия первых d_2 компонент из векторов с размерностью d_1 (компоненты предварительно сортируются в порядке убывания сингулярных значений) [8]. Указанное обстоятельство является существенным достоинством с точки зрения рассматриваемой задачи: очевидно, что для получения робастных результатов необходимо провести вычислительные эксперименты для значительного числа размерностей векторов вложения. Применение других известных подходов (к примеру, использующих глубокие нейронные сети) потребовало бы проведения трудоемких вычислений вложений для каждого значения параметра d .

В качестве метода оценки внутренней размерности был рассмотрен метод, предложенный Макферсоном и Швайнхартом [9], а также Адамсом и др. [1]. В методе базовой идеей является исследование свойств случайных величин, порождаемых персистентной гомологией для фильтраций Чеха и Вьеториса – Рипса; в частности, величины E_α^0 [11]:

$$E_\alpha^0(x_1, \dots, x_n) = \sum_{e \in T(x_1, \dots, x_n)} |e|^\alpha, \quad (5)$$

где $\{x_j\}_{j \in \mathbb{N}}$ – выборка независимых и одинаково распределенных случайных величин; $T(x_1, \dots, x_n)$ – остовное дерево минимального веса, построенное на этом множестве; $|e|, e \in T$ – значение веса, вычисляемое как евклидово расстояние между вершинами, ребра, принадлежащего дереву. В [11] показано, что:

$$C_1 \leq E_\alpha^0(x_1, \dots, x_n) / n^{\frac{\tilde{d}-\alpha}{\tilde{d}}} \leq C_2, \quad (6)$$

$$\frac{\log(E_\alpha^0(x_1, \dots, x_n))}{\log(n)} \rightarrow \frac{\tilde{d} - \alpha}{\tilde{d}}, \quad (7)$$

при $n \rightarrow \infty$; C_1 и C_2 положительны и не зависят от n . Данный факт позволяет оценить фрактальную размерность \tilde{d} для заданного множества $\{x_j\}_{j \in \mathbb{N}}, x_j \in \mathbb{R}^d$ (рис. 1) путем решения задачи

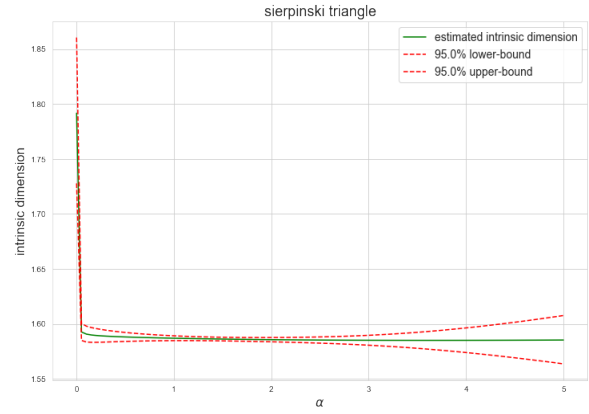


Рис. 1. Оценка внутренней размерности путем анализа персистентной гомологии. Зависимость величины внутренней размерности от значения параметра α для «треугольника Серпинского» ($\tilde{d} \approx 1,58$), оценка ограничена 95%-м доверительным интервалом. Видно, что для большинства значений α метод дает весьма точную оценку внутренней размерности

регрессии с помощью метода наименьших квадратов (МНК):

$$E_\alpha^0(x_1, \dots, x_n) = C(\alpha, \tilde{d}) n^{\frac{\tilde{d}-\alpha}{\tilde{d}}}, \quad (8)$$

$$\log(E_\alpha^0) = \theta_0 + \log(n) \theta_1, \quad (9)$$

$$\hat{\theta} \approx (X^*X)^{-1}Xy, \quad (10)$$

где X и y определены как

$$\begin{bmatrix} 1 & \log(n_1) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \log(n_L) \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} \log(E_\alpha^0(x_1, \dots, x_{n_1})_1) \\ \vdots \\ \log(E_\alpha^0(x_1, \dots, x_{n_L})_L) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

соответственно. В (11) L – количество равномерных выборок из основного множества точек, гиперпараметр алгоритма. Авторами в реальных экспериментах использовалось значение $L = 100$. После оценки вектора θ внутренняя размерность \tilde{d} в итоге может быть найдена по формуле:

$$\tilde{d} \approx \frac{\alpha}{1 - \hat{\theta}_1}. \quad (12)$$

Описанные в данном разделе подходы авторы применили для корпусов национальной литературы русского и английского языков. Далее приводятся описание и результаты соответствующего вычислительного эксперимента.

Анализ зависимостей «внутренняя размерность – параметр α » для значительного числа стандартных мультифракталов позволил выявить следующие характерные черты: (1) нецелая величина внутренней размерности; (2) наличие характерных минимума и максимума зависимости, которые служат, соответственно, нижней и верхней оценками исследуемой размерности (рис. 2); (3) дальнейшая линейная зависимость внутренней размерности от α , которая не отражает действительного поведения исследуемой величины, но является артефактом алгоритма: на это указывает прежде всего увеличение доверительного интервала с ростом значений параметра α .

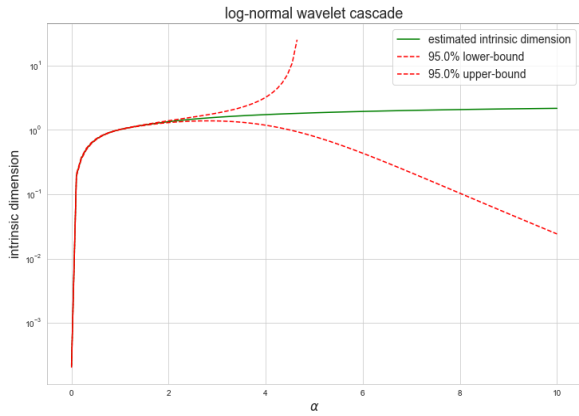


Рис. 2. График зависимости оценок алгоритма от значений параметра α для логнормального каскада



Рис. 3. Логнормальный каскад (на оси абсцисс отображены порядковые номера точек во временном ряде, на оси ординат – значения) с параметрами $\nu = -\ln(2)/4$, $\sigma = 0,1$; описан в работе [2]

Результаты

Эксперимент проводился в несколько этапов:

- для русского (\mathfrak{S}_1 , 6429 текстов) и английского (\mathfrak{S}_2 , 11052 текста) языков рассчитывались матрицы юниграмм и биграмм (103952 юниграмм и 14775439 биграмм для русского, 94087 юниграмм и 9490603 биграмм для английского) со значениями $d = \{5, 8, 14, 20\}$ (n изменялось в диапазоне от 100 тыс. до количества строк матрицы с фиксированным шагом, $L = 100$);

- для каждой матрицы записывались ответы алгоритма ($L = 100$) для диапазона значений параметра α от 0,0001 до 10 с шагом арифметической прогрессии $s \approx 0,1$;

- по результатам работы модели эмпирически оценивались недопустимые значения α по следующим критериям: расхождение доверительных интервалов линии регрессии и оценки параметра θ_1 , асимметрия распределения значений $\log(E_\alpha^0)$;

- среди ответов модели, прошедших проверку, выбирались максимальное и минимальное значения \tilde{d} .

В таблицах 1 и 2 продемонстрированы сводные результаты для юниграмм (слов) и биграмм, соответственно. Предварительные оценки показывают, что размерности юниграмм и биграмм для данных языков весьма мало (не превышает 10).

Не меньший интерес представляет изменение оценки \tilde{d} в зависимости от параметра α для биграмм (например, см. далее рис. 5).

Таблица 1. Оценка внутренней размерности юниграмм русского и английского языков с помощью алгоритма Schweinhart

Language	d	$\min \tilde{d}$	$\max \tilde{d}$
Russian	5	1,7	2,7
	8	2,8	3,5
	14	4,6	5,6
	20	4,9	6,6
English	5	2,0	2,6
	8	1,9	2,6
	14	2,4	3,3
	20	2,5	3,5

Таблица 2. Оценка внутренней размерности биграмм русского и английского языков с помощью алгоритма Schweinhart

Language	d	$\min \tilde{d}$	$\max \tilde{d}$
Russian	5	3,8	5,0
	8	4,3	5,8
	14	5,7	7,2
	20	6,0	8,4
English	5	3,2	4,5
	8	3,9	5,3
	14	5,0	7,9
	20	5,7	9,3

На рис. 4 и 5 приведены исследования внутренней размерности языка в зависимости от параметра алгоритма α .

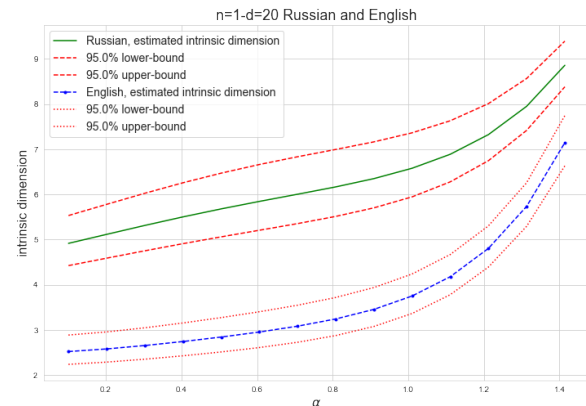


Рис. 4. Фрагменты графиков зависимости оценок алгоритма от значений параметра α для русского и английского языков. Юниграммы (слова), $d = 20$

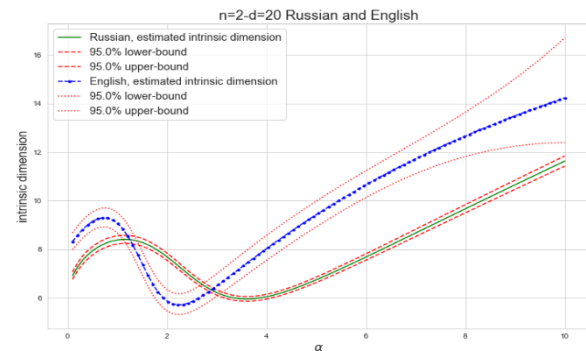


Рис. 5. Графики зависимости оценок алгоритма от значений параметра α для русского и английского языков. Биграммы. $d = 20$. Значительное изменение ответов алгоритма в зависимости от α в левой части графика свидетельствует о мультифрактальной структуре объектов [9]

Множество слов в обоих языках представляет собой многообразие, размерность которого для русского языка порядка 4, для английского – порядка 2. Множество биграмм представляет собой фрактальную структуру, (нецелая) размерность которой близка к 6 для русского и к 7 – для английского.

Литература

1. *Adams H. et al.* A fractal dimension for measures via persistent homology // Abel Symposia. ArXiv. 2019. abs/1808.01079, 25 p.
2. *Arneodo et al.* Random cascades on wavelet dyadic trees // Journal of Mathematical Physics. 1998. V. 39(8).
3. *Bellegarda J.* Latent Semantic Mapping: Principles and Applications // Morgan & Claypool Publishers. 2007. 101 p.
4. *Brown T.B. et al.* Language Models are Few-Shot Learners // ArXiv. 2020, abs/2005.14165v4. 75 p.
5. *Devlin J. et al.* BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // ArXiv. 2018, abs/1810.04805v2. 16 p.
6. *Golub G., Kahan W.* Calculating the singular values and pseudo-inverse of a matrix // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics; Series B: Numerical Analysis, 1965. V. 2(2). P. 205–224.
7. *Gromov V.A., Migrina A.M.* A Language as a Self-Organized Critical System // Hindawi Complexity. V. 2017. ArticleID 9212538. 7 p.
8. *Kalman D.* A singularity valuable decomposition: the SVD of a matrix // The college mathematics journal. 1996. V. 27(1). P. 2–23.
9. *MacPherson R.D., Schweinhart B.* Measuring shape with topology // Journal of Mathematical Physics. 2012. V. 53(7).
10. *Peters M.E. et al.* Deep contextualized word representations // ArXiv. 2018, abs/1802.05365. 15 p.
11. *Schweinhart B.* Fractal dimension and the persistent homology random geometric complexes // Advances in Mathematics. Academic Press. 2020. V. 372.
12. *Shopen T.* Language Typology and Syntactic Description // Grammatical Categories and the Lexicon. Cambridge University Press. 2007. V. 3.
13. *Wayne H.* The Germanic Languages // Cambridge Language Surveys. Cambridge University Press. 2015. DOI:10.1017/CBO9780511755071.

Семантические траектории текстов естественного языка (поймай бота)

В.А. Громов, К.Н. Данг, А.С. Коган

Высшая школа экономики, Москва,
stroller@rambler.ru; dqnhu00@gmail.com; yarolika00mail.ru

Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта привело к тому, что подавляющее большинство человечества находится в ситуации, которую философы характеризуют как «постправда». Одним из основных факторов, которые определяют протекание этого процесса, являются технологии искусственного интеллекта, позволяющие генерировать тексты, – боты.

В настоящий момент языковая личность формируется под воздействием текстов, написанных людьми, – от сказок в детстве до учебника по математическому анализу в университете; развитие технологий генерации текстов в самое ближайшее время приведёт к тому, что мы окажемся от рождения погружёнными в гигантский океан текстов, сгенерированных ботами. Боты генерируют тексты гораздо быстрее, чем люди их пишут. Это обстоятельство с неизбежностью приведёт к сильной деформации развития языковой личности человека и вызовет необходимость создания систем искусственного интеллекта, которые позволят отличить тексты, сгенерированные ботами, от текстов, написанных человеком. В качестве базовых гипотез, на которых предполагается строить классификаторы, мы использовали следующие:

- При рассмотрении семантического пространства слов, данных своими векторными представлениями, области, «посещаемые» ботами и людьми, совпадают. В то время как для семантического пространства n -грамм существуют области, «посещаемые» преимущественно людьми, и области, «посещаемые» преимущественно ботами: люди обычно чаще, чем боты, продуцируют неожиданные последовательности слов, сколь бы сложными последние ни были.

- Соответственно, наличие в тексте большого числа n -грамм из областей, «посещаемых» преимущественно ботами, и малого числа n -грамм из областей, «посещаемых» преимущественно людьми, свидетельствует о том, что текст с высокой степенью вероятности сгенерирован ботом.

- При кластеризации множества n -грамм текстов, сгенерированных ботами, мы получаем более компактные кластеры, чем при кластеризации текстов, написанных людьми. Характеристики указанных кластеризаций статистически значительно отличаются друг от друга.

- При нечёткой кластеризации мы получаем для текстов, написанных людьми, нечёткие кластеры с менее ярко выраженным чётким ядром, чем для ботов.

- Характеристики семантических траекторий – последовательности векторных эмбедингов

слов текста, рассматриваемые как многомерный временной ряд текстов, написанных людьми, и текстов, сгенерированных ботами, статистически значительно отличаются друг от друга.

Данные

В качестве текстов, написанных людьми, используются тексты художественной литературы. Сравнение производится с текстами, сгенерированными различными ботами (основанные на LSTM-модели, GPT-2, YaLM¹ и др.). Тексты генерировались «постранично» – по 500 слов на каждое 500-е слово из литературного текста. Таким образом мы добиваемся сходства в распределении длин текстов разного типа. Текстовые данные были предобработаны: была проведена лемматизация и замена числительных, местоимений и имен на специальные токены.

Для изучения семантического пространства рассматриваются векторные представления не только слов, встречаемых в текстах, но также и конкатенации векторных представлений для ряда последовательно идущих слов (n -граммы). В качестве векторных представлений используется метод SVD [1], а также Word2Vec-модели [2].

Кластеризация

Проверка гипотезы о различии характеристик кластеризаций для n -граммов, полученных из множества текстов, написанных людьми, и кластеризаций для n -граммов, полученных из множества текстов, сгенерированных ботами, а также гипотезы о существовании областей семантического пространства с высокой степенью вероятности «посещаемых» только людьми и только ботами, предполагает кластеризацию множества n -граммов с помощью того или иного алгоритма кластеризации.

В данной работе использовались несколько алгоритмов кластеризации:

- K-Means [3];
- C-Means [4];
- Алгоритм Уишарта [5];
- Алгоритм Уишарта на нечётких числах [6].

Таким образом, рассматриваются два варианта кластеризации, а также их нечёткие вариации. Для введения нечёткости при использовании алгоритма Уишарта мы строим нечёткие числа [6] на основе векторных представлений n -грамм. Для получившихся нечётких представлений n -грамм вы-

¹ <https://yandex.ru/lab/yalm>.

числяются попарные нечёткие расстояния [6], которые далее используются при кластеризации алгоритмом Уишарта.

Из полученных кластеризаций выделялись и изучались следующие (нормированные) характеристики:

- количество уникальных векторов в кластере, нормирование по размеру самого большого кластера;
- количество уникальных векторов в кластере, нормирование по общему количеству уникальных векторов;
- количество векторов с повторениями в кластере, нормирование по размеру самого большого кластера;
- количество векторов с повторениями в кластере, нормирование по общему количеству векторов с повторениями;
- максимальное расстояние от элемента кластера до центра кластера;
- среднее расстояние от элемента кластера до центра кластера;
- максимальное расстояние между элементами в кластере;
- среднее расстояние между элементами в кластере.

Для выявления структурных различий между текстами, написанными людьми, и текстами, сгенерированными ботами, рассматриваются эмпирические распределения данных статистик. С помощью критерия непараметрической статистики Вилкоксона [7] устанавливалось, порождены ли каждые пары выборок (соответствующие ботам и людям) разными распределениями. В качестве метода поправки на множественную проверку гипотез использовался метод Хольма – Бонферрони [8].

В таблице 1 приведены результаты сравнений кластеризаций векторов n -грамм людей и ботов для различных языков, ботов и эмбеддингов. Видно, что при использовании эмбеддингов CBOW для всех языков и для всех ботов были найдены статистически значимые отличия. При эмбеддингах SVD и Skip-Gram не на всех языках были найдены отличия.

Таблица 1. Результаты сравнения кластеризаций. Для конкретного языка, бота и эмбеддинга на пересечении стоит количество (из 8) характеристик, при сравнении которых были найдены статистически значимые различия

	Русский				Английский		Немецкий		Вьетнамский	
	LST M	GPT 2	mG PT	YaL M	LST M	GPT 2	LST M	GPT 2	LST M	GPT 2
SVD	3	4	4	0	6	2	4	4	0	0
CBOW	2	4	1	3	8	6	2	7	4	4
Skip-Gram	0	0	0	0	0	0	6	8	0	0

t-SNE-визуализация семантического пространства для литературных текстов и текстов ботов LSTM и GPT-2 представлена на рис. 1.

Предположительно, в семантическом пространстве присутствуют области, в которых есть векторы n -грамм только людей или только ботов. Данное предположение требует проверки и теоретически может быть использовано для классификации текстов.

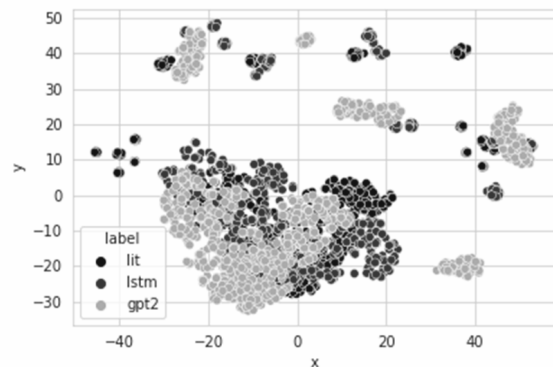


Рис. 1. t-SNE-визуализация семантического пространства русского языка, векторное представление – SVD

На рис. 2, 3 представлены распределения внутрикластерного расстояния для текстов на вьетнамском и русском языках. Средние значения статистики для литературных текстов расположены правее соответствующих значений для текстов ботов. Таким образом, тексты, сгенерированные ботами, расположены ближе к центрам кластеров. Это подтверждает ранее поставленную гипотезу о большей компактности кластеров, полученных в результате кластеризации множества n -грамм текстов, сгенерированных ботами.

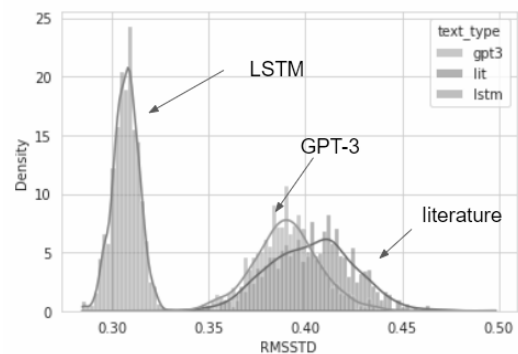


Рис. 2. Распределение внутрикластерного расстояния текстов вьетнамского языка

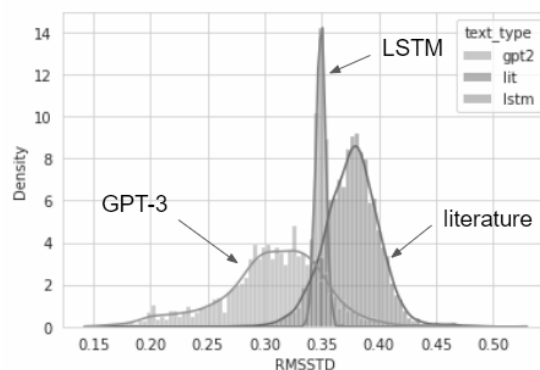


Рис. 3. Распределение внутрикластерного расстояния текстов русского языка

Плоскость энтропии – сложности

Альтернативный подход к решению задачи различения текстов естественного языка базируется на понятии семантической траектории текста. Под семантической траекторией мы понимаем последовательность векторных представлений слов текста [9], рассматриваемых как многомерный временной ряд (в работе [9] устанавливается факт хаотичности семантических траекторий, отвечающих текстам литературных произведений).

Для анализа хаотических временных рядов в работе Мартино, Пластино, Россо [10] был предложен метод, позволяющий отличать хаотические ряды, с одной стороны, от простых детерминированных процессов, с другой стороны, от стохастических процессов. В качестве энтропии используется энтропия Шеннона. Сложность определяется как

$$C_{JS}[P] = Q_J[P, P_e]H_s[P]. \quad (1)$$

Здесь Q_J ($0 \leq Q_J \leq 1$) – нормированная дивергенция Дженсона – Шеннона между P (распределение порядковых паттернов, см. [10]) и P_e (равномерное распределение).

Для вычисления метрик энтропии и сложности, а также теоретических границ была имплементирована библиотека *ordec*. Код включает в себя реализацию вышеописанной модификации метода энтропии – сложности для многомерного случая, чего нет в других библиотеках.

Таким образом, каждому тексту, данному своей семантической траекторией, можно сопоставить точку на плоскости «энтропия – сложность». Расположение точки относительно теоретических границ на указанной плоскости определяет тип ряда [10]. Простые стохастические процессы соответствуют точкам в правом нижнем углу, простые детерминированные – в левом нижнем, хаотические процессы дают точки, близкие к вершине кривой верхней теоретической границы [10].

Мы полагаем, что истинную динамику текста на естественном языке отражают именно те значения величин, при которых семантическая траектория отображается в область хаоса. Более подробно эти вопросы рассмотрены в работе [9]. На рис. 4 в качестве примера для вьетнамского языка приведены значения параметров d (размерность векторного представления) и n (число слов), при которых подавляющее большинство семантических траекторий корпуса национальной литературы отображается в область хаоса.

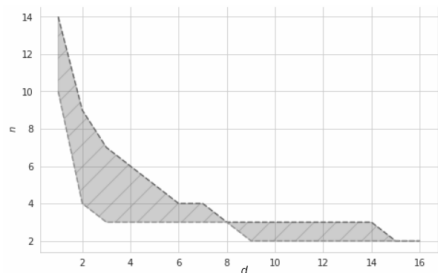


Рис. 4. Значения d и n , при которых литературные тексты вьетнамского языка попадают в область хаотических процессов

Пример плоскости энтропии – сложности для одного из таких наборов параметров ($n = 3, d = 4$) представлен на рис. 5, где видно, что тексты попадают в хаотическую область и литературные тексты хорошо отделяемы от текстов, сгенерированных ботами.

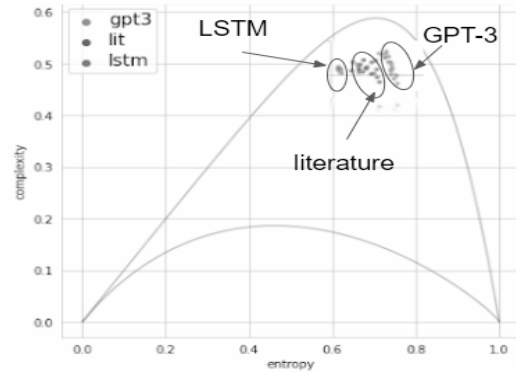


Рис. 5. Расположение текстов вьетнамского языка на плоскости энтропии-сложности

Классификация

Вышеперечисленными методами были выявлены статистически значимые различия в структуре в семантическом пространстве между текстами, написанными людьми, и текстами, сгенерированными ботами. На основе этого мы используем рассмотренные выше статистики в качестве признаков для построения простейших классификаторов (а именно метод опорных векторов с L2-регуляризацией).

В таблицах 2–4 приведены результаты наилучших классификаторов для русского, английского и вьетнамского языков. Заметим, что боты идентифицируются лучше всего по признакам от алгоритма Уишарта. Мы предполагаем, что алгоритм K-Means (и его нечеткая вариация C-Means) действуют хуже, поскольку данные, скорее всего, зашумленные, а кластеры имеют произвольную форму (K-Means на таких данных работает не так хорошо, как плотностные алгоритмы кластеризации). При этом для вьетнамского и английского языков наблюдается улучшение качества от применения метода фаззификации данных: для вьетнамского и на всех ботах, и на GPT-боте отдельно точность классификации повышается, для английского точность для алгоритма Уишарта на нечетких числах выше всего при классификации GPT-текстов отдельно.

Таблица 2. Точность классификаторов текстов на русском языке

Алгоритмы	Все боты	LSTM	GPT-3
K-Means	0.934	1.0	0.916
Wishart	0.954	1.0	0.944
C-Means	0.894	1.0	0.857
F.Wishart	0.913	1.0	0.911
Энтропия – сложность	0.890	0.992	0.893

Таблица 3. Точность классификаторов текстов на английском языке

Алгоритмы кластеризации	Все боты	LSTM	GPT-3
K-Means	0.975	1.0	0.881
Wishart	0.975	1.0	0.881
C-Means	0.970	1.0	0.921
F.Wishart	0.947	1.0	0.940
Энтропия – сложность	0.965	1.0	1.0

Таблица 4. Точность классификаторов текстов на вьетнамском языке

Алгоритмы кластеризации	Все боты	LSTM	GPT-3
K-Means	0.903	1.0	0.881
Wishart	0.896	1.0	0.900
C-Means	0.893	1.0	0.871
F.Wishart	0.942	1.0	0.926
Энтропия – сложность	0.968	1.0	0.995

Общие выводы и дальнейшее направление работы

В рамках исследования задачи идентификации ботов были применены методы кластерного анализа, а также методы из теории информации – построение плоскости энтропии-сложности. Основными результатами исследования мы выделяем следующие пункты:

- Существуют статистически значимые различия (протестировано критерием Вилкоксона) в кластеризациях датасетов векторов n -грамм из текстов ботов и литературы. Данные различия возможно обнаружить при использовании эмбедингов CBOW, эмбединги SVD и Skip-Gram для

данной цели не подходят. Эти различия можно в дальнейшем использовать для выделения признаков, по которым можно определить источник текста (бот/человек).

- Тексты, сгенерированные ботами, структурно проще: их кластеры компактнее и четче. Классификаторы, построенные на основе внутрикластерных расстояний, отличают тексты, написанные людьми, от текстов, сгенерированных ботами, с точностью в 0,9 и выше.
- Предположительно, существуют области семантического пространства, «посещаемые» только ботами или только людьми. Поиск данных областей и их использование для классификации – одно из направлений дальнейших исследований.

Литература

1. *Bellegarda J. R.* Latent semantic mapping: principles and applications // Synthesis Lectures on Speech and Audio Processing. 2007. V. 3, № 1. P. 1–101.
2. *Mikolov T., Chen K., Corrado G. and Dean J.* Efficient estimation of word representations in vector space // arXiv preprint arXiv: 1301.3781, 2013.
3. *Lloyd, S. P.* Least squares quantization in PCM // Information Theory, IEEE Transactions. 1982. P. 129–137.
4. *Bezdek J. C., Ehrlich R. and Full W.* FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm // Computers and geosciences 10.2–3, 1984. P. 191–203.
5. *Wishart D.* A numerical classification methods for deriving natural classes // Nature 221. 1969. P. 97–98.
6. *Novák V., Perfilieva I. and Mockor J.* Mathematical principles of fuzzy logic // Springer Science and Business Media. 2012. V. 517.
7. *Wilcoxon F.* Individual comparisons by ranking methods // Breakthroughs in statistics, Springer. 1992. P. 196–202.
8. *Holm S.* // A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. 1979.
9. *Gromov V. A. and Dang Q. N.* Semantic and Sentiment Trajectories of Literary Masterpieces. // SSRN preprint No. 4457882. DOI: 10.2139/ssrn.4457882.
10. *Rosso O. A., Larrondo H. A., Martin M. T., Plastino A. and Fuentes M. A.* Distinguishing noise from chaos // Physical review letters. 2007. V. 99, № 15, 154102.

Особенности электрической активности головного мозга при ортодонтической коррекции

М.О. Журавлев^{1,2}, А.Е. Руннова¹, Д.Е. Суетенков¹, Р.К. Насруллаев¹

¹ Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

² Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, zhuravlevmo@gmail.com

Представленная работа посвящена изучению изменений колебательной структуры в электрической активности головного мозга под воздействием выраженного соматического стресса, возникающего после медицинских ортодонтических процедур. Сегодня исследование активности головного мозга с позиций методов нелинейной динамики и теории динамического хаоса является мейн-стримом нейронауки [1–4].

Исследование проводилось на 8 добровольцах, условно здоровых мужчинах в возрасте 19–25 лет. Критериями включения в группу исследования являлось наличие зубочелюстных аномалий. При их диагностике были определены такие патологии, как дистальная окклюзия (аномалии 2 класса по классификации Э. Энгля [5, 6], здесь и далее), мезиальная окклюзия (аномалии 3 класса) и аномалии положения отдельных зубов (аномалии 1 класса). Все испытуемые были разделены на три группы, исходя из стратегии их ортодонтического лечения. Пациенты, отнесенные к группе I, проходили лечение с помощью лигируемых брекет-систем производства G&H с 0022 пазом и дугами NiTi 0014. При использовании брекет-систем давление осуществлялось на все зубы обоих зубных рядов. Остальные пациенты получали лечение на основе материалов и элайнеров производства Align Technology [7–9]. При воздействии элайнеров давление оказывалось локальным образом, а испытуемые были разделены на две отдельные (II и III) группы в зависимости от количества зубов, на которые осуществлялось воздействие. У всех пациентов II и III подгрупп в процессе ортодонтической коррекции была задействована только 1 челюсть. Однако во II и III группах пациентов давление проводилось на 3–5 и на 1–2 зуба, соответственно.

С каждым добровольцем выполнялось два независимых повторных нейрофизиологических мониторинга в день до наложения коррекционной аппаратуры (эксперимент № 1) и на следующий

день после ортодонтического вмешательства (эксперимент № 2), как схематично продемонстрировано на рис. 1. У каждого добровольца поверхностно регистрировали электрическую активность головного мозга с помощью ЭЭГ-датчиков и собирали данные с помощью регистратора Энцефалан-ЭЭГР-19/26 (ООО «Медиком МТД», Россия). Общая длительность экспериментальной работы составила 45–65 минут, в рамках которой испытуемый проходил 4 когнитивных теста (см. рис. 1): тест прямого счета беспорядочно расположенных объектов; тест повторения узора на матрице; тест матрицы Шульте; тест монотонного предъявления зрительных стимулов. В данной работе представлены результаты обработки 16 нейрофизиологических мониторингов, зарегистрированных у 8 добровольцев с выполненной ортодонтической коррекцией.

Для численной обработки биомедицинских сигналов, зарегистрированных в активности коры головного мозга, был использован метод оценки колебательных паттернов, основанный на одновременной оценке энергий, частот и времени диагностики скелетонов непрерывного вейвлетного преобразования, разработанный ранее в работе [10]. Использование этого метода позволяет различать динамику различных колебательных компонент, присутствующих в сложном сигнале, как это показано для модельных систем [10], а также апробировано для обработки реальных сигналов живых систем [10–12].

Начальным этапом обработки ЭЭГ-сигналов являлись стандартные процедуры повышения качества записей путем снижения влияния глазодвигательных и мышечных артефактов на основе стандартных методов [13–15]. Выбранные для анализа сигналы активности головного мозга, зарегистрированные в затылочной области скальпа, естественно, удалены от зон активности жевательного аппарата и височного сустава, что позволяет утверждать практически отсутствие влияния

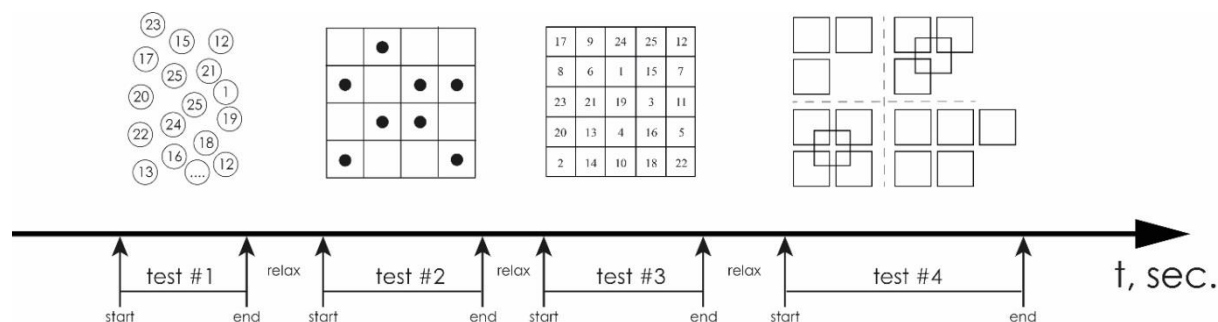


Рис. 1. Порядок прохождения нейропсихологических тестов согласно временной шкале

артефактов от изменений в активности жевательного мышечного аппарата. Далее, для ЭЭГ каждого канала производился расчет количества и продолжительности частотных колебательных паттернов на базе непрерывного вейвлетного преобразования. Процедура расчета данных паттернов была предложена и подробно описана в работе [10]. Вся колебательная активность была рассмотрена в диапазоне 1–50 Гц с разделением на 25 равных частотных диапазонов с шириной 2 Гц: Δf_1 1–2, Δf_2 2–4, ..., Δf_i , ..., Δf_{25} 48–50. Для каждого Δf_i – во временном окне 30 секунд оценивалось количество паттернов, N_p , время жизни паттернов.

Предварительные оценки позволили выделить затылочный канал регистрации ЭЭГ, соответствующий О1 отведению, в котором наиболее сильно проявляются изменения в электрической активности при ортодонтических процедурах. Анализ активности в этом канале позволяет наблюдать максимально выраженные изменения в динамике колебательных паттернов в области высоких частот. Далее, для независимой оценки изменений активности головного мозга в процессе ортодонтической коррекции была произведена иерархическая кластеризация на основе среднего количества паттернов до и после ортодонтических коррекций в заданном частотном диапазоне, оцениваемых для канала О1 в следующих диапазонах частот: Δf_9 16–18, Δf_{11} 20–22, Δf_{12} 22–24, Δf_{13} 24–26, Δf_{14} 26–28, Δf_{17} 32–34, Δf_{22} 42–44, Δf_{23} 44–46, Δf_{24} 46–48 и Δf_{25} 48–50 Гц. Процедура кластеризации по оценке изменений в колебательных процессах, происходящих в единственном затылочном канале, тем не менее позволила разделить массив данных на три кластера, совпадающих с клиническими группами участников исследования. Различия выявленных кластеров пациентов максимально для групп пациентов, лечение которых основано на использовании брекет-систем и элайнеров. Различия на основе оценки ЭЭГ-активности для пациентов групп II и III, использующих элайнеры, отличаются в меньшей степени, и данное разделение является менее надежным.

В перспективе дальнейшее развитие и накопление базы экспериментальных данных может позволить создать системы мониторинга стрессового воздействия в самом начале ортодонтических коррекций, т. е. объективно выявить пациентов с повышенной чувствительностью. Для подобных пациентов возможно изменение процесса зубной коррекции, например, временное снижение силы воздействия. Кроме того, представляет интерес дальнейшая оценка успешности выполнения ортодонтической коррекции в сравнении с нейрофизиологическими и нейропсихологическими оценками, производимыми при тестировании пациентов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минздрава России № 056-00030-21-01 от 05.02.2021 г. «Теоретическое и экспериментальное исследование интегративной активности различных физиологических систем человека

при стрессовых воздействиях» (номер государственного учета НИОКТР 121030900357-3).

Литература

1. *Salmon E. et al.* Regional brain activity during working memory tasks // *Brain*. 1996. V. 119, № 5. P. 1617–1625.
2. *Fox M.D., Raichle M.E.* Spontaneous fluctuations in brain activity observed with functional magnetic resonance imaging // *Nature reviews neuroscience*. 2007. V. 8, № 9. P. 700–711.
3. *Pavlov Y.G., Kotchoubey B.* Oscillatory brain activity and maintenance of verbal and visual working memory: a systematic review // *Psychophysiology*. 2022. V. 59, № 5. P. e13735.
4. *Wolf T.G. et al.* Functional changes in brain activity using hypnosis: a systematic review // *Brain sciences*. 2022. V. 12, № 1. P. 108.
5. *Campbell S., Goldstein G.* Angle's Classification—A Prosthodontic Consideration: Best Evidence Consensus Statement // *Journal of Prosthodontics*. 2021. V. 30, № S1. P. 67–71.
6. *Alhammadi M.S. et al.* Skeletal and dentoalveolar effects of class II malocclusion treatment using bi-maxillary skeletal anchorage: a systematic review // *BMC Oral Health*. 2022. V. 22, № 1. P. 1–16.
7. *Weir T.* Clear aligners in orthodontic treatment // *Australian dental journal*. 2017. V. 62. P. 58–62.
8. *Lagravere M.O., Flores-Mir C.* The treatment effects of Invisalign orthodontic aligners: a systematic review // *The Journal of the American Dental Association*. 2005. V. 136, № 12. P. 1724–1729.
9. *Djeu G., Shelton C., Maganzini A.* Outcome assessment of Invisalign and traditional orthodontic treatment compared with the American Board of Orthodontics objective grading system // *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*. 2005. V. 128, № 3. P. 292–298.
10. *Runnova A. et al.* Modified wavelet analysis of ECoG-pattern as promising tool for detection of the blood-brain barrier leakage // *Scientific reports*. 2021. V. 11, № 1. P. 18505.
11. *Simonyan M. et al.* Oscillatory wavelet-patterns in complex data: mutual estimation of frequencies and energy dynamics // *The European Physical Journal Special Topics*. 2022. P. 1–9.
12. *Sergeev K. et al.* Wavelet skeletons in sleep EEG-monitoring as biomarkers of early diagnostics of mild cognitive impairment // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2021. V. 31, № 7. P. 073110.
13. *Runnova A.E. et al.* Mathematical approach to recover EEG brain signals with artifacts by means of Gram-Schmidt transform // *Saratov Fall Meeting 2016: Laser Physics and Photonics XVII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data III*. SPIE, 2017. V. 10337. P. 254–259.
14. *Kim C.S. et al.* Removal of ocular artifacts using ICA and adaptive filter for motor imagery-based BCI // *IEEE/CAA journal of automatica sinica*. 2017.
15. *Grubov V.V. et al.* Adaptive filtering of electroencephalogram signals using the empirical-modes method // *Technical Physics Letters*. 2017. V. 43. P. 619–622.

Новый метод детектирования сердечного ритма для автоматической обработки записей ночного мониторинга сна

М.О. Журавлев^{1,2}, М.В. Агальцов¹, А.Р. Киселев¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины, Саратов

² Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
zhuravlevmo@gmail.com

Одним из основных направлений по внедрению новых методов нелинейной динамики является их применение в области медицины, в частности, одной из перспективных задач по применению таких методов является клиническая оценка сна пациентов [1–4]. По сей день клиническую оценку сна проводят врачи-сомнологи рутинным методом визуального анализа ночных полисомнограмм в соответствии с официальными стандартами [5–7]. Это не только длительная и утомительная человеческая работа, но и субъективный анализ данных. Внедрение новых методов анализа должно позволить реализовать автоматизацию процесса стадирования сна, что в свою очередь приведет к увеличению эргономичности анализа, сократит человеческие затраты и упростит работу специалистов в области исследований сна.

Одним из направлений анализа полисомнографических записей является исследование сердечного ритма пациента во время сна, при этом оцениваются такие параметры, как частота сердечных сокращений (ЧСС) и вариабельность сердечного ритма (ВСР) [8]. Частота сердечных сокращений и вариабельность сердечного ритма являются физиологическими параметрами, отражающими регуляцию вегетативной нервной системы и общее самочувствие. ЧСС показывает количество сердечных сокращений в минуту, а ВСР указывает изменение времени между двумя последовательными сердечными сокращениями или интервалами между сердечными сокращениями. Сегодня наиболее традиционным способом анализа ЧСС является выделение времени регистрации высшей точки R-зубца (см. рис. 1, а) на электрокардиограммы (ЭКГ) [8, 9]. Данный ме-

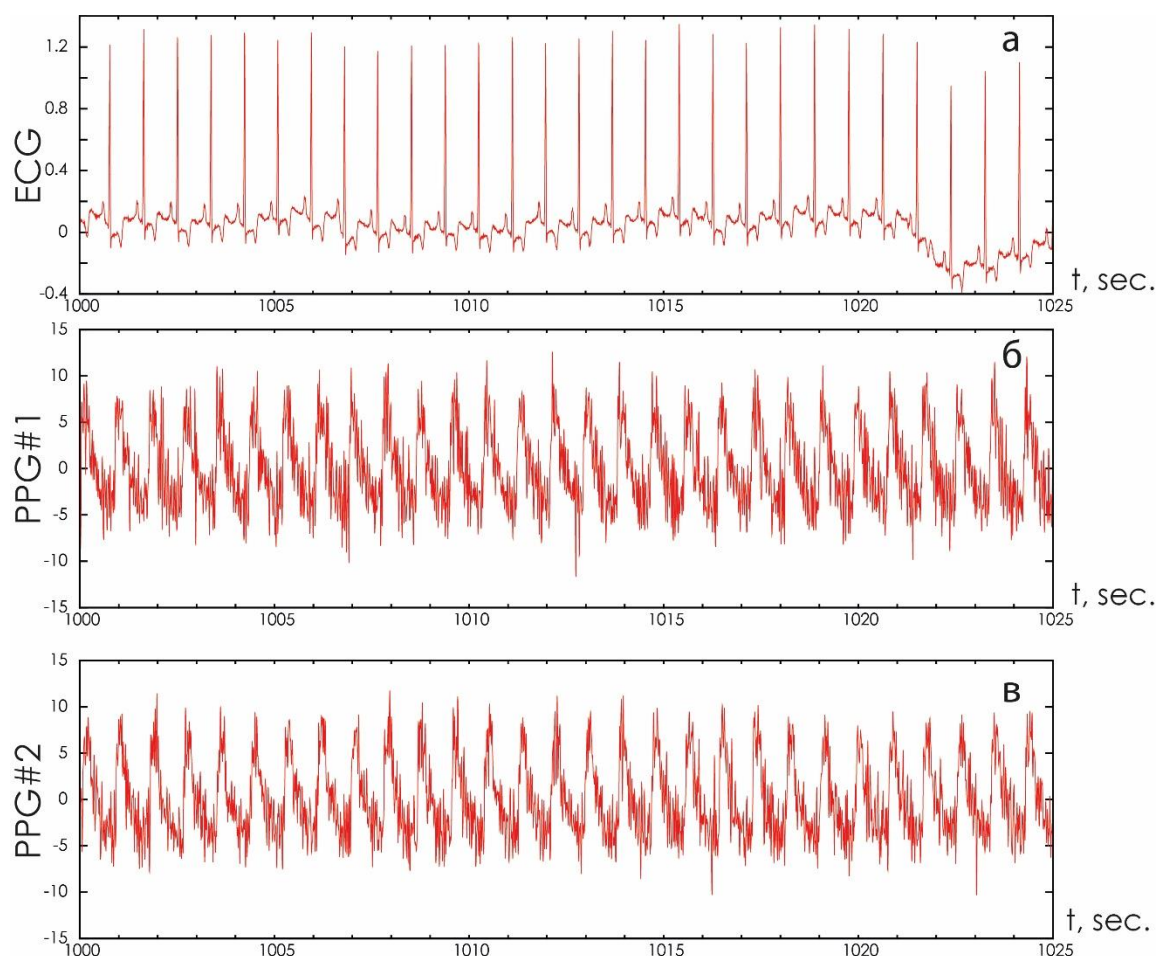


Рис. 1. Ночной мониторинг сна: а – ЭКГ-сигнал, б и в – ФПГ-сигнал, установленный на пальце и на ухе пациента

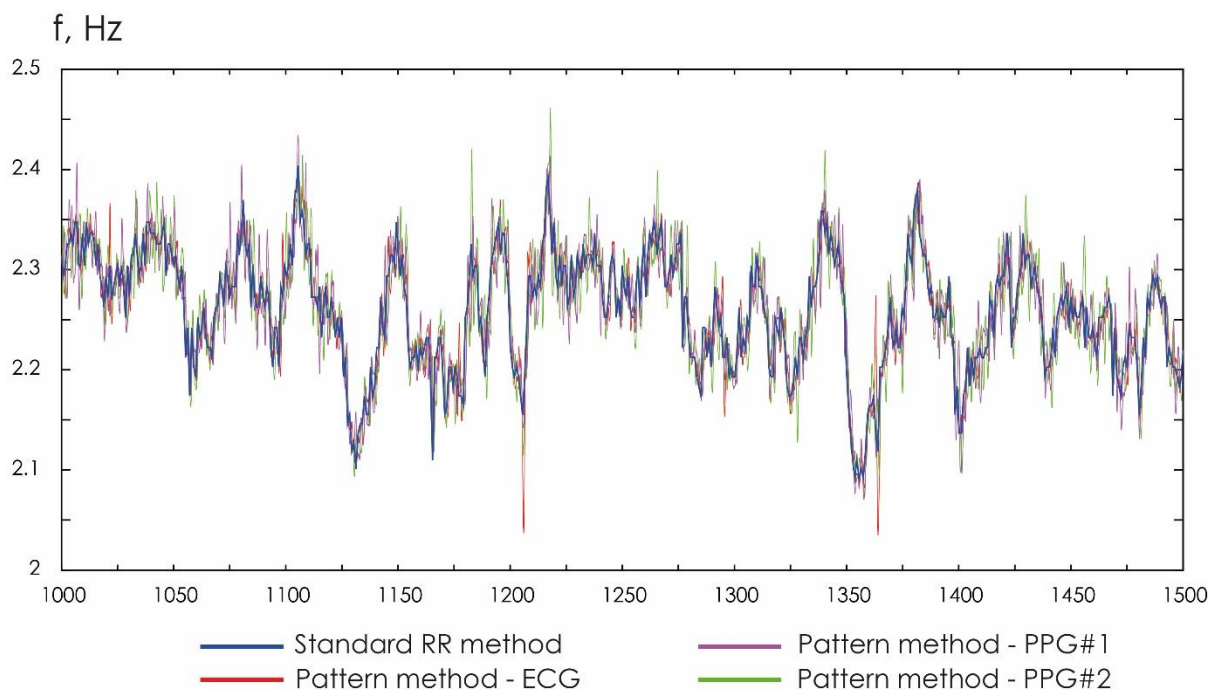


Рис. 2. Выделенный сердечный ритм из сигнала ЭКГ и ФПГ классическим методом и разработанным методом частотных паттернов

тод хорош своей простотой и возможностью реализации даже на самых простых электронных схемах. В то же время очевидно, что этот подход весьма затруднен в случаях аритмий, нарушений сердечной проводимости и/или дыхательной недостаточности, когда R-зубец может быть существенно деформирован, изменяя свою выраженность и форму от цикла к циклу сердечного сокращения. В то же время этот метод весьма затруднителен при реализации подобного анализа ЧСС на таких сигналах кардиоваскулярной природы, как фотоплетизмограмма (см. рис. 1, б, в). В рамках данной работы предлагается универсальный метод выделения ЧСС для длительных записей полисомнографии, основанный на нелинейном анализе колебательной структуры сигналов ЭКГ и фотоплетизмограммы (ФПГ), позволяющий детектировать динамику сердечного ритма с временным разрешением, превышающим таковое у классических методов. Кроме того, предлагаемый способ позволяет работать с сигналами даже при существенном зашумлении и отделять помехи от основной ритмической компоненты сердечной активности.

Предложенный метод основан на ранее разработанном научной группой подходе к выделению и анализу колебательных паттернов на основе непрерывного вейвлетного преобразования [10–12]. С помощью анализа частотно-временной поверхности кардиограммы/фотоплетизмограммы определение сердечного ритма удается провести не только в моменты детекции R-зубцов (или, аналогично, других характерных точек ЭКГ), а практически непрерывно по всему записанному сигналу. В работе продемонстрировано, что реализация метода позволяет выделить ритм сердечных сокращений с одинаково высокой точностью при анализе ЭКГ- и ФПГ-сигналов (см. рис. 2), что, в свою очередь,

открывает значительные перспективы для автоматического анализа параметров активности сердечно-сосудистой системы во время длительных записей ночного сна у пациентов с помощью простых наручных устройств типа часов или пальцевых датчиков, использующих записи ФПГ. Кроме того, с фундаментальной научной точки зрения применение такого метода для анализа полных записей ПСГ позволяет более полно рассмотреть вопросы синхронизации в ритмах активности центральной нервной и сердечно-сосудистой систем.

Исследование проведено в рамках научной работы «Разработка алгоритмов распознавания маркеров нарушений дыхания во сне у пациентов с различными формами сердечно-сосудистой патологии», выполняемой в ФГБУ «НМИЦ ТПМ» Минздрава России в соответствии с государственным заданием Минздрава России на 2022–2024 гг.

Литература

1. Tagluk M.E., Sezgin N., Akin M. Estimation of sleep stages by an artificial neural network employing EEG, EMG and EOG // Journal of medical systems. 2010. V. 34. P. 717–725.
2. Schaltenbrand N. et al. Sleep stage scoring using the neural network model: comparison between visual and automatic analysis in normal subjects and patients // Sleep. 1996. V. 19, № 1. P. 26–35.
3. Acharya U.R. et al. Nonlinear dynamics measures for automated EEG-based sleep stage detection // European neurology. 2016. V. 74, № 5–6. P. 268–287.
4. Tsinalis O., Matthews P.M., Guo Y. Automatic sleep stage scoring using time-frequency analysis and stacked sparse autoencoders // Annals of biomedical engineering. 2016. V. 44. P. 1587–1597.
5. Carskadon M.A., Rechtschaffen A. Monitoring and staging human sleep // Principles and practice of sleep medicine. 2011. V. 5. P. 16–26.
6. Carney P.R., Berry R.B., Geyer J.D. (ed.). Clinical sleep disorders. Lippincott Williams & Wilkins, 2005.

7. *Carskadon M.A. et al.* Normal human sleep: an overview // Principles and practice of sleep medicine. 2005. V. 4, № 1. P. 13–23.
8. *Malik M.* Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use: Task force of the European Society of Cardiology and the North American Society for Pacing and Electrophysiology // Annals of Noninvasive Electrocardiology. 1996. V. 1, № 2. P. 151–181.
9. *Parák J., Havlík J.* ECG signal processing and heart rate frequency detection methods // Proceedings of Technical Computing Prague. 2011. V. 8. P. 2011.
10. *Runnova A. et al.* Modified wavelet analysis of ECoG-pattern as promising tool for detection of the blood–brain barrier leakage // Scientific reports. 2021. V. 11, № 1. P. 18505.
11. *Simonyan M. et al.* Oscillatory wavelet-patterns in complex data: mutual estimation of frequencies and energy dynamics // The European Physical Journal Special Topics. 2022. P. 1–9.
12. *Sergeev K. et al.* Wavelet skeletons in sleep EEG-monitoring as biomarkers of early diagnostics of mild cognitive impairment // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2021. V. 31, № 7. P. 073110.

Сверточная нейронная сеть с моделью динамического синапса

И.А. Зимин, С.В. Стасенко

Лаборатория перспективных методов анализа многомерных данных ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
stasenko@neuro.nnov.ru

Кратковременная память, также известная как рабочая память, является важным объектом изучения в современной нейронауке. Разработка технических решений, расширяющих базовый функционал нейронных сетей, основана на имитации различных функций мозга. Текущей проблемой искусственных нейронных сетей в целом является то, что они, имитируя принцип работы кратковременной памяти, производят результаты, которые трудно интерпретировать. Более перспективными направлениями, обладающими интерпретируемостью и способностью развиваться, с появлением новых экспериментальных данных о работе мозга, являются спайковые нейронные сети и гибридные подходы, которые комбинируют искусственные нейронные сети и модели вычислительной нейронауки.

В данном исследовании предлагается гибридная архитектура нейронной сети с моделью динамического синапса для воспроизведения эффекта кратковременной памяти. Предыдущие эксперименты показали, что кратковременная память может осуществляться благодаря постоянной нейронной активности или кратковременной синаптической пластичности. В предложенной архитектуре модель динамического синапса включает как кратковременную синаптическую пластичность [1], так и астроцитарную модуляцию [2]. Было показано, что астроциты, реагируя на нейротрансмиттеры, высвобождаемые пресинаптическими нейронами, могут модулировать синаптическую передачу путем взаимодействия с пресинаптическими или постсинаптическими терминалями [2]. Использование астроцитарной модуляции также позволяет расширить временной диапазон модуляции нейронной активности по сравнению с кратковременной синаптической пластичностью и поддерживать баланс возбуждения и торможения в сети, обеспечивая гомеостаз. В качестве модели кратковременной синаптической пластичности использовалась модель Цодыкса – Марккрама [3], а для описания астроцитарной модуляции была применена модель астроцитарной активности, представленная в работах [4] и [5].

На наборе данных, состоящем из 8 изображений из датасета CIFAR-10 была предобучена сверточная нейронная сеть, содержащая два полносвязных и два сверточных нейронных слоя. Входные данные последнего слоя (64 нейрона) данной сети использовались как вход для модели, имитирующей кратковременную память.

Предложенная архитектура нейронной сети была протестирована на задаче определения ранее запомненных и новых изображений, предъявляемых последовательно. Также она была сравнена с моделями STPNet (использующей только кратковременную синаптическую пластичность) и RNN (рекуррентной нейронной сетью) на этой же задаче. С использованием метрики (d-прайм), которая была впервые предложена в работе [1] для такого типа задач, было показано, что наша архитектура нейронной сети с астроцитарной модуляцией достигает более высокой точности в классификации ранее запомненных и новых изображений.

Работы выполнены при поддержке гранта РФФИ № 22-71-00074.

Литература

1. Hu B., Garrett M.E., Groblewski P.A., Ollerenshaw D.R., Shang J., Roll K., ... & Mihalas S. Adaptation supports short-term memory in a visual change detection task // PLoS computational biology. 2021. V. 17, № 9. P. e1009246.
2. Perea G., Navarrete M., Araque A. Tripartite synapses: astrocytes process and control synaptic information // Trends Neurosci. 2009 Aug;32(8):421–31.
3. Mongillo G., Barak O. & Tsodyks M. Synaptic Theory of Working Memory // Science. 319, 1543–1546 (2008,3). <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1150769>.
4. Gordleeva S.Y. et al. Bi-directional astrocytic regulation of neuronal activity within a network // Front. Comput. Neurosci. 2012. V. 6, November. P. 92.
5. Stasenko S., Kazantsev V. 3D model of bursting activity generation // 2022. Fourth International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN). IEEE, 2022. P. 176–179.

Бионический подход к моделированию динамики интеллектуальных систем (на примере анализа гиперспектральных изображений)

Ю.Т. Каганов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Предполагается развитие аналога осцилляторного метода яркостной кластеризации для задач анализа и обработки гиперспектральных изображений (кластеризации и семантической сегментации). Дальнейшее развитие нейробионической концепции предполагает использование теории динамических систем, реализованной на основе многоагентного подхода, а также использования метаграфовых моделей как реализации иерархической организации сложных нейронных сетей.

1. Особенности задач обработки гиперспектральных изображений

Гиперспектральные изображения (hyperspectral images, HSI) определяются совокупностью данных, в которых представлены как яркостная, так и спектральная информация, характеризующие изображение, – трехмерным массивом цветных пикселей и множеством спектральных кривых, определенных для всех пикселей. Для черно-белых изображений полное множество гиперспектральных данных удобно представлять в виде трехмерного куба (3D data cube), содержащего двумерный пиксельный массив яркостной информации и одномерный массив спектральной информации для каждого пикселя (массив значений дискретизированной спектральной кривой). Трудности анализа гиперспектральных изображений связаны с тремя обстоятельствами: 1) многопиксельными массивами яркостей; 2) большим числом спектральных каналов; 3) сложным поведением спектральных кривых (с большим числом экстремумов). При этом полная окрестность каждого пикселя, как правило, содержит сильно избыточную информацию. Поэтому возникает необходимость предобработки – получения массивов гиперспектральных данных меньших размеров с сохранением наиболее существенной информации об изображении (так называемое «сжатие» данных).

Процедура «сжатия» тесно связана с определением множества неизбыточных характеристик изображения – так называемых «признаков» (higher-level features). Получение признаков основано на исключении избыточной информации и скрытых корреляций, содержащихся в исходных данных. Одним из известных эффективных методов сжатия данных является метод главных компонент (Principle Component Analysis, PCA). Другие эффективные методы сжатия больших данных доставляют нейросетевые подходы, основанные на построении моделей многослойных сетей-автоэнкодеров (stacked autoencoders, SAE).

С особенностями решения задач обработки гиперспектральных изображений, связанными с анализом спутниковых данных, можно ознакомиться в работе [4].

2. Бионический метод яркостной сегментации чисто яркостных изображений

Метод яркостной сегментации чисто яркостных (не содержащих спектральной информации) изображений был развит в [1–3] на основе построения модели осцилляторной многоагентной системы с управляемой синхронизацией (OMAS, oscillatory multiagent system). Была построена пространственно двумерная система осцилляторов предельного цикла с изменяемой внутренней динамикой осцилляторов и изменяемым осцилляторным взаимодействием. Метод яркостной сегментации можно отнести к бионическим методам, поскольку в модели OMAS отражены экспериментально подтвержденные особенности работы мозга: 1) использование зрительной корой колебательной нейронной активности и синхронизации в процессе работы; 2) использование зрительной системой мозга динамического связывания по яркости в процессе обработки зрительной информации.

Процессором OMAS является осциллятор, динамика которого моделирует динамику нейронного осциллятора первичной зрительной коры мозга, образованного парой связанных нейронов (возбуждающего и тормозного). Это релаксационный осциллятор – осциллятор предельного цикла с параметрически управляемой бифуркационной динамикой (устойчивый предельный цикл динамической системы, соответствующий наличию устойчивых автоколебаний, бифурцирует в фокус, соответствующий переходу в состояние устойчивого равновесия посредством быстро затухающих колебаний). Осцилляторы OMAS расположены в узлах двумерной пространственной решетки, находящейся во взаимно-однозначном соответствии с пиксельным массивом анализируемого изображения. Динамика осциллятора OMAS определяется характеристиками пикселя – яркостью и направлением максимального градиента яркости в пикселе. Состояние осциллятора характеризуется парой действительных переменных (комплексной переменной $u = u^{(1)} + iu^{(2)}$). Динамика осцилляторной системы OMAS управляется системой ОДЕ, записанной для комплексных переменных u_{jm} , определяющих состояния всех осцилляторов [3]:

$$\dot{u}_{jm} = f(u_{jm}; I_{jm}) + \sum_{j', m'}^N W_{jmj'm'}(u_{j'm'} - u_{jm}), \quad (1)$$

$$j = 1, \dots, M; m = 1, \dots, N.$$

Функции $f(u_{jm}; I_{jm})$ определяют внутреннюю динамику изолированных осцилляторов, а компоненты $W_{jmj'm'}$ матрицы взаимодействия осцилляторов построены в виде произведения трех функций:

$$W_{jmj'm'} = P_{jmj'm'}(\rho, \rho') Q_{jmj'm'}(\mathbf{s}, \mathbf{s}') \times D_{jmj'm'}(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|), \quad (2)$$

зависящих от размеров предельных циклов ρ и ρ' взаимодействующей пары осцилляторов, от направлений \mathbf{s} и \mathbf{s}' максимального градиента яркости внутри пикселей и от пространственного расстояния между осцилляторами в OMAS. Сомножитель $P_{jmj'm'}$ определен пороговой сигмоидальной функцией

$$P_{jmj'm'} = w_0 H_{jmj'm'}(\rho_{jm} \rho'_{jm} - h),$$

зависящей от произведения размеров предельных циклов ρ и ρ' , благодаря чему взаимодействие двух осцилляторов становится пренебрежимо малым, если хотя бы один из них находится в состоянии низкой активности. Сомножитель

$$Q_{jmj'm'}(\mathbf{s}, \mathbf{s}')$$

определен дельта-образной функцией, зависящей от $\mathbf{s} - \mathbf{s}'$, а сомножитель

$$D_{jmj'm'}(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)$$

обеспечивает «обрезание» взаимодействия в OMAS на заданном конечном расстоянии. При таком построении взаимодействия в OMAS пара осцилляторов OMAS оказывается связанной, если оба осциллятора обладают достаточно большими амплитудами автоколебаний ρ и ρ' , достаточно близкими \mathbf{s} и \mathbf{s}' , а также расположены в системе на расстоянии, не превышающем заданный радиус пространственного взаимодействия. Построенная модель OMAS приводит к самоорганизованному возникновению кластерной синхронизации в осцилляторной системе, при которой синхронизованные кластеры осцилляторов соответствуют фрагментам изображения различного уровня яркости. При осуществлении яркостной сегментации используется также метод адаптации общей силы взаимодействия в OMAS и специальный рекуррентный процесс последовательной сегментации, состоящий из L шагов (L – число яркостных фрагментов изображения). Процесс начинается с задания величины минимальной силы взаимодействия, при которой синхронизуется кластер OMAS, соответствующий фрагменту изображения наибольшей яркости. Далее производится постепенное увеличение общей силы взаимодействия в системе и последовательное отключение из взаимодействия уже синхронизованных кластеров осцилляторов. Это позволяет произвести последовательное выделение всех фрагментов изображения, начиная с фрагмента наибольшей яркости.

3. Дальнейшее развитие динамического подхода к бионическим моделям мозга

Осцилляторные нейронные сети представляют собой один из многих вариантов динамических систем, существующих в мозговых структурах. Моделирование этих структур на основе исследования их динамики позволяет с одной стороны лучше понять принципы работы мозга, а с другой – построить более совершенные модели искусственных нейронных сетей по сравнению с традиционными. Разработка моделей осцилляторных многоагентных систем с управляемой синхронизацией (OMAS) является подтверждением этой идеи. Основным свойством динамики многоагентных систем является наличие процессов самоорганизации, т.е. возникновение новых качеств, отсутствовавших у исходных агентов [5]. Дальнейшее развитие этого направления может быть связано с учетом иерархической организации реальных нейронных сетей и их динамической самоорганизации. В этом плане чрезвычайно большой интерес представляют работы К.В. Анохина [6, 7] в области разработки теории когнитива. Когнитивом представляет собой иерархическую динамическую сетевую структуру с гранулярной системой устойчивых нейронных образований. Такая структура может быть представлена в виде метаграфа, отражающего сложную иерархическую сеть с эмерджентностью в вершинах метаграфа [10]. Метаграфовый подход базируется на представлении сетевой организации в виде динамической системы [8], которая может быть интерпретирована на основе методов символической динамики как графовая структура [9].

Метаграф – это холонически (иерархически) организованный граф:

$$MG = \langle V, MV, E \rangle. \quad (3)$$

Вершина метаграфа характеризуется множеством атрибутов:

$$v_i = \{atr_k\}, \quad v_i \in V,$$

где v_i – вершина метаграфа; atr_k – атрибут. Ребро метаграфа также определяется множеством атрибутов, включая характеристики исходной и конечной вершин:

$$e_i = \langle v_s, v_e, \{atr_k\} \rangle, \quad e_i \in E, \quad (4)$$

где e_i – ребро метаграфа; v_s – исходная вершина (метавершина) ребра; v_e – конечная вершина (метавершина) ребра; atr_k – атрибут. Каждая из вершин верхнего уровня метаграфа может быть интерпретирована как гранула, которая соответствует более высокому уровню отображения. В свою очередь информация, возникающая в результате взаимодействия нейронных структур мозга и окружающей среды, определяется внутренними целями, соответствующими иерархии целей на каждом уровне работы мозговых систем. Цель можно интерпретировать как функционал, который определяет, насколько внутренняя картина мира, сформированная в результате работы мозга, отличается от реальной картины мира. Она может

быть представлена в виде гиперповерхности, имеющей множество экстремумов и изменяющейся в соответствии с изменением окружающей среды. Семантика возникает, когда воздействие внешней среды оценивается системой на основе некоторой шкалы, определяемой целью. В результате формируется система аттракторов, которая определяет поведение системы и реакцию системы на внешние воздействия, что и характеризует её прагматику. В свою очередь иерархическая структура аттракторов формирует также систему уровней языков, состоящих из различного типа символов. На каждом уровне имеется своя символика, определяемая средой, в которую погружена система аттракторов соответственно семантике, определяемой этой средой. Взаимодействие между языками происходит путем формирования иерархии структур системы аттракторов. Структура аттракторов на самом верхнем уровне определяет характер будущих реакций, необходимых для адекватного ответа на воздействие внешней среды. Таким образом осуществляется переход от динамики взаимодействия нейронных структур к символическому представлению процессов обработки информации мозгом. Это позволяет строить более адекватные модели нервной системы по сравнению с традиционными моделями многослойных искусственных нейронных сетей коннекционистского типа.

Заключение

Рассмотрены модели динамического типа, основанные на осцилляторных нейронных сетях [1–3]. Они позволили построить более адекватные модели нейронных сетей, а также более быстрые и гибкие нейросетевые алгоритмы обработки изображений по сравнению с алгоритмами, основанными на моделях традиционных нейронных сетей. Можно отметить, что дальнейшее развитие направления, связанное с динамическим подходом [8, 9] и его интерпретацией с точки зрения теории метаграфов [10] позволит выйти на новый уровень моделирования в теории искусственных нейронных сетей и интеллектуальных систем [11].

Литература

1. *Kuzmina M., Manykin E., Surina I.* Oscillatory network with self-organized dynamical connections for synchronization-based image segmentation // *BioSystems*. 2004. V. 76. P. 43–53.
2. *Гричук Е.С., Кузьмина М.Г., Маныкин Э.А.* Выделение объектов в зрительной сцене осцилляторно-сетевым методом // *Нейроинформатика-2009* (11 Всероссийская научно-техническая конференция). Сборник науч. трудов. Москва, 2009. Часть 2, с. 254–261.
3. *Kuzmina M., Manykin E., Grichuk E.* Oscillatory Neural Networks in problems of parallel information processing. *Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston*, 2014 (printed in Germany).
4. *Windrim L., Ramakrishnan R., Melkumyan A., Murphy R.J., Chlingaryan A.* Unsupervised feature-learning for hyperspectral data with autoencoders // *Remote Sens.* 2019, 11, 864; <https://doi.org/10.3390/rs11070864>.
5. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М. : Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
6. *Анохин К.В.* Когнитом: гиперсетевая модель мозга // XVII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Нейроинформатика-2015», 2015. Сб. научн. тр. в 3 частях. Под общ. ред. Трофимова А.Г. С. 14–15.
7. *Анохин К.В.* Когнитом: в поисках фундаментальной научной теории сознания // *Журнал высшей нервной деятельности*. 2021. Т. 71, № 1. С. 39–71.
8. *Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С.* Основы теории сложных систем. Москва – Ижевск: НИЦ РХД, 2007. 620 с.
9. *Osipenko G.* Dynamical systems, graphs, and algorithms. *Springer-Verlag*, 2007.
10. *Tarasov V., Kaganov Y., Gapanyuk Y.* The Metagraph Model for Complex Networks: Definition, Calculus, and Granulation Issues // *Proceedings of the XIX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains (DAMDID/RCDL 2017)*. Moscow, Russia, 2017. P. 342–349.
11. *Каганов Ю.Т., Гапанюк Ю.Е.* Нелинейная динамика и происхождение когнитивных процессов интеллектуальных систем // «Бионика–60 лет. Итоги и перспективы: сб. статей Первой Международной научно-практической конференции. Москва, 17–19 декабря 2021. С. 41–51.

О длительности динамической памяти в спайковых нейронных сетях

В.В. Клиньшов, А.В. Ковальчук

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород,
vladimir.klinshov@ipfran.ru

Паттерны спонтанной активности корковых нейронов, как правило, очень нерегулярны, демонстрируя пуассоновскую статистику интервалов между спайками в коротких промежутках времени и колебания частоты возбуждения в более длительных временных масштабах. Классическая теория, объясняющая происхождение нерегулярного поведения нейронов, использует парадигму приблизительного баланса между сильным возбуждением и торможением, которые в большинстве случаев компенсируют друг друга, оставляя активность сети обусловленной флуктуациями, которые периодически нарушают сбалансированные условия [1]. Асинхронные сбалансированные состояния с нерегулярной слабо коррелированной локальной активностью наблюдались в сетях реалистичных спайковых нейронов. Эти состояния можно назвать гомогенными, так как частоты возбуждения всех нейронов примерно равны и стационарны.

Тем не менее введение сбалансированной парадигмы возбуждения-торможения само по себе не решает второй части проблемы изменчивости, поскольку оно все еще не объясняет, как сети быстрых спайковых нейронов могут генерировать флуктуации частоты в медленных временных масштабах. Эти колебания являются отличительной чертой состояния, обычно называемого частотным хаосом или гетерогенным состоянием [2] для описания как временной изменчивости частоты, так и неравномерного распределения частот по нейронам. Частотный хаос впервые наблюдали в моделях сетей частотных нейронов [3], явно продемонстрировав переход от регулярной к хаотической динамике. В отличие от этого ожидается, что сети спайковых нейронов в термодинамическом пределе всегда будут хаотичными. Тем не менее вопрос о переходе от гомогенного к гетерогенному хаотическому режиму в спайковых сетях до сих пор остается дискуссионным, и потенциальное физическое объяснение может заключаться в том, что выше перехода флуктуации как нейронных входов, так и выходов становятся сильно окрашенными. В последнее время было предпринято много усилий, чтобы понять точные динамические механизмы, лежащие в основе частотного хаоса, и его возможную функциональную роль для нейронных вычислений. Было выявлено несколько сценариев, ведущих к возникновению частотного хаоса в реалистичных сетях спайковых нейронов. В частности, высокая изменчивость и медленная динамика частот были продемонстрированы в сетях с кластерными возбуждающими связями [4]. Было показано, что сильно гетероген-

ные хаотические состояния возникают в разреженной случайной сети для сильных синаптических связей [2]. Наконец, наблюдается переход к частотному хаосу, когда время синаптической интеграции становится большим по сравнению с характерным временем нейронной динамики [5].

Считается, что частотный хаос играет важную роль в облегчении сложных вычислений, происходящих в мозгу [6], поскольку было показано, что он поддерживает флуктуации в течение более длительного времени, что приводит к замедлению нейронной активности, связанной с поведением, обучением и памятью. Сети хаотических всплесков уже успешно обучены для выполнения вычислительных задач, таких как генерация сигналов, классификация входных данных или прогнозирование нелинейной динамики. Имея это в виду, разумно предположить, что использование гетерогенных, а не гомогенных хаотических состояний может улучшить вычислительные возможности сети. Действительно, во многих приложениях данные накапливаются в течение нескольких секунд, что требует сравнительно большой динамической памяти. В настоящем исследовании мы обращаемся к проблеме, могут ли медленные флуктуации частоты, наблюдаемые в гетерогенном хаотическом состоянии, служить основой для такой динамической памяти.

Рассмотрим сеть из N тета-нейронов, динамика которой определяется выражением

$$\frac{d\theta_j}{dt} = (1 - \cos \theta_j) + I_j(1 + \cos \theta_j), \quad (1)$$

где θ_j – локальные фазовые переменные, связанные с соответствующими мембранными напряжениями соотношением $V_j = \tan(\theta_j/2)$. Входные токи I_j состоят из двух членов $I_j = I_b + s_j$, где I_b обозначает постоянный ток смещения, а s_j представляет собой синаптический ток. Говорят, что нейрон j производит спайк, когда его фаза пересекает значение $\theta_j = \pi$. Спайки фильтруются двойными экспоненциальными синапсами вида

$$\frac{dr_j}{dt} = -\frac{r_j}{\tau_d} + h_j, \quad (2)$$

$$\frac{dh_j}{dt} = -\frac{h_j}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_r \tau_d} \sum_{i_j^p} \delta(t - t_j^p). \quad (3)$$

Параметры τ_r и τ_d обозначают время синаптического подъема и затухания соответственно, r_j – выходной ток синапса, а t_j^p – время возбуждения нейрона j . Общий синаптический ток, полученный нейроном j , определяется выражением

$$s_j = g \sum_{k=1}^N A_{jk} r_k, \quad (4)$$

где g – сила связи, A_{jk} – элементы матрицы смежности, определяющие структуру синаптических связей.

Сначала рассмотрим разреженную случайную сеть с вероятностью связности $p = 0,1$. Для простоты мы не разделяем нейроны на возбуждающие и тормозные пулы и получаем силу связи каждой ненулевой связи из распределения Гаусса с нулевым средним и дисперсией $(Np)^{-1}$. Вместе со слегка отрицательным током смещения $I_b = -0,001$ это обеспечивает баланс между возбуждением и торможением, так что общая активность сети определяется флуктуациями, а не средним значением.

Для изучения коллективной динамики сети мы возбудили 10 произвольных нейронов и смоделировали активность сети в течение $t = 20$ с. Постоянные времени синаптического подъема и спада фиксированы на $\tau_r = 2$ мс и $\tau_d = 20$ мс, а сила связи g используется в качестве управляющего параметра. Обнаружено, что если сила связи превышает некоторое критическое значение g_c , хаотическая самоподдерживающаяся активность выходит из состояния покоя. Для сил связи, немного превышающих порог, сетевая активность является разреженной, нерегулярной и слабо коррелированной, как показано на рис. 1 для $g = 0,3$. Цепочки спайков отдельных нейронов являются субпуассоновскими с усредненной по сборке частотой возбуждения $3,74 \pm 1,24$ Гц, а соответствующие распределения интервалов между спайками характеризуются средним коэффициентом вариации $0,81 \pm 0,13$.

Дальнейшее увеличение силы связи приводит к значительным изменениям состояния сети. Так, при $g = 1$ более сильная связь не только увеличивает среднюю частоту возбуждения до $18,14 \pm 6,96$ Гц, но и вызывает переход к частотному хаосу, когда частота возбуждения нейронов демонстрирует медленные колебания. На уровне динамики спайков характерный эффект заключается в том, что нейроны имеют тенденцию генерировать всплески спайков, чередующиеся с длительными периодами покоя. Также отметим, что в гетерогенном режиме динамика отдельных нейронов становится более коррелированной по сравнению с гомогенным состоянием.

Помимо увеличения силы связи, другой сценарий, о котором ранее сообщалось, вызывающий переход к частотному хаосу, основан на увеличении характерного синаптического времени. Чтобы проверить такой сценарий в нашей модели, мы фиксируем силу связи на уровне $g = 0,5$ и варьируем время затухания синапса τ_d . Хотя средняя частота возбуждения заметно не меняется и составляет ≈ 8 Гц для любого $\tau_d > 20$ мс, средний коэффициент вариации для интервалов между спайками заметно растет с синаптическим временем.

До сих пор мы рассматривали только сети со случайной топологией соединения. Теперь разде-

лим сеть на $M = 5$ равных групп и перемонтируем возбуждающие связи таким образом, чтобы связность внутри каждого группового вывода стала больше, чем связность между группами p_{out} . Коэффициент кластеризации $R = p_{in} / p_{out}$ вводится для измерения степени кластеризации, при этом значение $R = 1$ соответствует однородной случайной сети. Гетерогенная активность и самая высокая изменчивость наблюдаются при промежуточной степени кластеризации $R \sim 4$. В то время как средний коэффициент вариации лишь немного превышает 1, его стандартное отклонение примерно такое же, что свидетельствует о наличии значительного числа нейронов с $CV \approx 2$ и выше. Среднее время корреляции также достигает максимума при промежуточных степенях кластеризации и достигает нескольких сотен миллисекунд. Проявление гетерогенной нерегулярной активности для сетей с промежуточной кластеризацией аналогично двум предыдущим сценариям: нейроны имеют тенденцию генерировать всплески спайков. Однако локальные всплески имеют тенденцию коррелировать внутри кластеров, что вызывает выраженные медленные колебания активности кластеров.

После подробного изучения динамики сети мы исследуем связь между ее внутренней активностью и вычислительными возможностями, в частности, ее способность служить в качестве сети с динамической памятью. Для этого обучим сеть выполнять простую вычислительную задачу задержки, определяемую следующим образом: сеть получает один вход в виде последовательности всплесков и должна указать, получила ли она всплеск или нет в течение периода заданной продолжительности. В частности, сеть должна ответить «1», если она получила хотя бы один всплеск в течение последних τ миллисекунд, и «0» в противном случае. Максимальное значение задержки τ , при котором сеть показывает достаточную точность, дает разумную оценку времени жизни ее динамической памяти.

В качестве входного сигнала используется пуассоновская последовательность импульсов с частотой $\lambda = 1$ Гц. Чтобы подать вход в сеть, сигнал (4), полученный каждым нейроном, изменяется на

$$s_j = g \sum_{k=1}^N A_{jk} r_k + g_{inp} u_j r_{inp}, \quad (5)$$

где g_{inp} – входное усиление, веса u_j выбираются независимо из равномерного случайного распределения $[-1; 1]$, а r_{inp} – входной синаптический ток, определяемый тем же набором уравнений, что и уравнения (2), (3). Выход сети рассчитывается как

$$r_{out} = \sum_{j=1}^N w_j r_j, \quad (6)$$

настроив выходные веса w_j для обучения сети выполнению требуемой задачи. Ответ сети считается как «1», если его выход превышает $1/2$, и как «0» в противном случае.

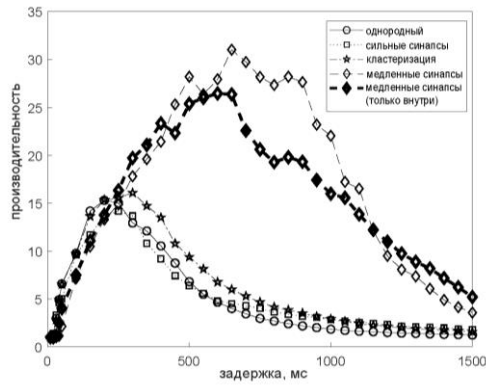


Рис. 1. Производительность сети P в зависимости от задержки τ . Сплошная линия с кружками: сеть в однородном состоянии; пунктирная линия с квадратами: сеть с сильными синапсами ($g = 2$); штрихпунктирная линия со звездочками: сеть с кластерными связями ($R = 4$); пунктирная линия с ромбами: сеть с медленными синапсами ($\tau_d = 60$ мс); толстая пунктирная линия с ромбами: сеть с медленными внутренними синапсами ($\tau_d = 60$ мс), но быстрыми входными синапсами ($\tau_{d,inp} = 20$ мс)

Описанный подход соответствует классической вычислительной структуре резервуарных вычислений, методу машинного обучения, основанному на машинах с жидкостным и экологическим состоянием [7, 8] для решения задач, использующих отклик динамической системы, называемой резервуаром, на определенный вход, имеющий выход, генерируемый путем линейного объединения состояний считывающих узлов. Резервуарные вычисления имеют преимущество эффективного процесса обучения, поскольку обучаются только считываемые веса, влияющие на выходные данные, в то время как входные веса и веса внутри резервуара остаются неизменными. При обучении выходных весов w_j мы использовали метод наименьших квадратов или рекурсивный алгоритм наименьших квадратов [9]. Оба метода дали похожие результаты, и мы предпочли метод наименьших квадратов, так как он был быстрее. После некоторого периода обучения t_{train} производительность сети оценивалась в течение тестового периода $t_{test} = 100$ с. Для характеристики производительности сети измерялась ошибка:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 v_0 + \varepsilon_1 v_1, \quad (7)$$

где v_0 и v_1 — доли ложных выходных сигналов, равных нулю или единице соответственно, а ε_0 и ε_1 — веса ошибок, заданные таким образом, что постоянный выход либо нуля, либо единицы приводит к суммарной ошибке $\varepsilon = 1$. Затем производительность P оценивается как величина, обратная ошибке $P = 1/\varepsilon$.

Чтобы решить проблему увеличения времени жизни динамической памяти сети, мы обучили ее выполнять задачу задержки для разных значений задержки τ и проанализировали производительность P . Результаты, представленные на рис. 1, показывают производительность с точки зрения задержки для нескольких различных configura-

ций сети. В частности, мы исходили из сети со слабыми и быстрыми синапсами и без кластеризации связей ($g = 0,5$, $\tau_d = 20$, $R = 1$), которая допускает однородное состояние. Оптимальная производительность $P \approx 15$ достигается при задержке $\tau \approx 200$ мс. При малых задержках $\tau < 100$ мс производительность сети низкая, так как она не успевает отреагировать на стимул. При больших задержках производительность быстро падает и достигает половины максимального значения при $\tau \approx 500$ мс. Это указывает на то, что динамическая память сети длится около 0,2 с.

Далее мы увеличили силу синапсов до $g = 2$ и проверили, улучшит ли это производительность сети. Для такой сильной связи последовательности спайков демонстрируют гораздо более длительное время корреляции (около 250 мс), что интуитивно предполагает гораздо более длительную динамическую память. Удивительно, однако, что усиление синапсов изменило производительность сети лишь немного, а наблюдаемая динамическая память все еще составляла около 0,25 с. Мы также изучили влияние кластеризации с $R = 4$, что соответствует максимальному времени корреляции около 230 мс. Это привело к некоторому улучшению производительности сети, которая становится оптимальной при $\tau = 300$ мс и падает вдвое при $\tau = 600$ мс. Таким образом, время жизни динамической памяти в кластеризованной сети незначительно увеличивается по сравнению с сетью в однородном состоянии и достигает 0,3 с.

Наконец, мы рассмотрели сценарий с участием медленных синапсов, увеличив время синаптического распада до $\tau_d = 60$ мс. Этот подход наиболее сильно повлиял на динамическую память сети. Мы обнаружили, что производительность сети действительно существенно улучшилась, при этом плоский максимум $P \approx 30$ достигается на широком интервале $\tau = 500-1000$ мс. При больших задержках производительность сети быстро ухудшается, так что динамическая память сети может быть оценена как 1 с. Мы проверили также, может ли расширение динамической памяти быть вызвано изменением самого раздражителя, так как при более длительном синаптическом времени она состоит из более длинных импульсов. Для этого мы уменьшили время затухания входных синапсов только до $\tau_d = 20$ мс и сохранили внутренние синапсы с $\tau_d = 60$ мс, заметив, что производительность сети незначительно снизилась, но все еще существенно превосходит сеть с быстрыми синапсами. Действительно, время жизни динамической памяти в этом случае по-прежнему составляет около 1 с.

Мы рассмотрели три различных сценария возникновения частотного хаоса в разреженной сети спайковых нейронов и изучили их влияние на вычислительную способность сети для выполнения простой задачи динамической памяти. Признаком частотного хаоса являются медленные колебания частот отдельных нейронов, которые вводят новые временные масштабы, более длинные, чем те, которые связаны с динамикой синхронизации

спайков. Были рассмотрены три типовых сценария перехода к тарифному хаосу. Первый сценарий предполагает усиление синаптической связи, второй основан на замедлении динамики синапсов, а третий наблюдается при определенной степени кластеризации синаптических связей. Хотя обо всех трех сценариях сообщалось ранее, они по-прежнему рассматривались отдельно для разных сетевых моделей, и настоящее исследование впервые предоставляет универсальную модель, в которой все сценарии можно наблюдать и сравнивать, изменяя различные системные параметры, такие как связь, сила, время синаптического распада и степень кластеризации.

Было показано, что на микроскопическом уровне отдельных последовательностей нейронных спайков все три сценария дают очень похожие характеристики. Тем не менее вычислительные возможности базовых режимов оказались совершенно разными, по крайней мере при выполнении простых задач, связанных с задержкой. Мы показали, что динамическая память сети в гетерогенном состоянии существенно зависит от механизма, порождающего это состояние. В частности, для сценариев с сильными синапсами или кластеризацией связей продолжительность динамической памяти остается примерно такой же, как и в гомогенном состоянии. Напротив, сценарий с участием медленных синапсов приводит к существенному увеличению продолжительности динамической памяти, которая достигает значений выше 1 с.

Выявление механизмов, которые позволяют кортикальным сетям выполнять вычислительные задачи в масштабе секунд, в то время как локальная активность нейронов разворачивается в масштабе миллисекунд. Уже было показано, что простое увеличение размера сети очень мало влияет на время жизни памяти, поскольку оно масштаби-

руется только как логарифм размера сети [10]. Таким образом, основная проблема должна быть решена с точки зрения поиска подходящего механизма, который наделяет динамику сети длительными временными масштабами. Наше исследование, тем не менее, указывает на дополнительную проблему в том смысле, что простое присутствие более длинных временных масштабов в последовательности спайков может не гарантировать более длительную память.

Литература

1. *Van Vreeswijk C., Sompolinsky H.* Chaos in neuronal networks with balanced excitatory and inhibitory activity // *Science*. 1996. V. 274 (5293). P. 1724–1726.
2. *Ostojic S.* Two types of asynchronous activity in networks of excitatory and inhibitory spiking neurons // *Nature Neuroscience*. 2014. V. 17 (4). P. 594–600.
3. *Sompolinsky H., Crisanti A., Sommers H.-J.* Chaos in random neural networks // *Physical Review Letters*. 1988. V. 61 (3). P. 259.
4. *Litwin-Kumar A., Doiron B.* Slow dynamics and high variability in balanced cortical networks with clustered connections // *Nature Neuroscience*. 2012. V. 15 (11). P. 1498–1505.
5. *Kadmon J., Sompolinsky H.* Transition to chaos in random neuronal networks // *Physical Review X*. 2015. V. 5. P. 041030.
6. *Jaeger H.* The “echo state” approach to analysing and training recurrent neural networks—with an erratum note // *German National Research Center for Information Technology GMD Technical Report*. 2001. V. 148 (34). P. 13.
7. *Maass W., Natschl T., Markram H.* Real-time computing without stable states: a new framework for neural computation based on perturbations // *Neural Computations*. 2002. V. 2560. P. 2531–2560.
8. *Haykin S.* Adaptive filter theory // Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
9. *Wallace E., Maei H.R., Latham P.E.* Randomly connected networks have short temporal memory // *Neural Computations*. 2013. V. 25 (6). P. 1408–1439.

Реализация инкрементного обучения на сегментной спайковой модели нейрона

А.М. Корсаков¹, Т.Т. Исаков^{1,2}, А.В. Бахшиев²

¹Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург, anton_korsakov@mail.ru

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Введение

Решаемые нейроморфными системами задачи можно рассматривать с точки зрения машинного обучения. Инкрементное обучение (incremental learning) [1] – парадигма машинного обучения, которая предполагает извлечение новых знаний из поступающих новых данных и одновременную поддержку большей части ранее полученных знаний. При инкрементном обучении обучающие примеры не доступны в полном объеме в начале процесса обучения. Обучающие данные могут поступать в любое время, и тогда, если это необходимо, модель должна быть обновлена, при этом сохраняются приобретенные знания без доступа к старым обучающим примерам. Соблюдение указанных правил сопряжено с рядом сложностей.

В поступающих для обучения данных со временем может изменяться закон взаимосвязи между входными и выходными данными, который должна описывать модель, которую называют дрейфом понятий (concept drift). Дрейф понятий может быть небольшим, что, возможно, связано с шумом в данных, а может быть очень значительным, например, добавление нового класса данных. В момент, когда поступили новые обучающие данные, инкрементный алгоритм принимает решение о необходимости обучения этим данным. Если алгоритм решает обучить модель поступившим обучающим данным, то он должен быть построен так, чтобы использовать только полученные новые обучающие данные и модель в том состоянии, в котором она находилась в момент получения данных. Это связано с тем, что хранить все предыдущие обучающие примеры или иметь к ним доступ, что потребовалось бы при классическом подходе к решению задачи, для многих практических задач инкрементного обучения не представляется возможным.

В рамках нейроморфного подхода разрабатываются системы, которые строятся на принципах работы биологических нейронных сетей. Примером реализации нейроморфного подхода являются спайковые нейронные сети, которые воспроизводят импульсную природу биологических нейронных сетей. Как правило, существующие нейронные сети, в том числе спайковые, адаптируются к новым данным только за счет изменения числа нейронов и связей между ними в сети [2], в то время как в биологических нейронных сетях может происходить изменение как топологии нейронных структур, так и дендритных деревьев

отдельных нейронов. Такой подход будет рассмотрен в данной работе.

Целью настоящей работы является демонстрация возможности инкрементного обучения на сегментной спайковой модели нейрона путем изменения структуры дендритного дерева данной модели.

Сегментная спайковая модель нейрона CSNM и алгоритм ее структурного обучения

В рамках выполнения настоящей работы использовалась сегментная спайковая модель нейрона (CSNM) [3]. Предполагается, что на вход поступают спайки, которые преобразуются в сигналах в выходную величину, отображающую влияние синаптического тока на сегмент мембраны нейрона (рис. 1).

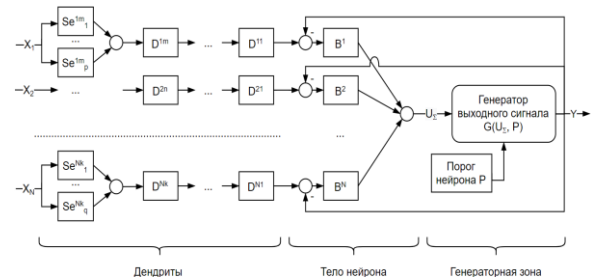


Рис. 1. Структура сегментной спайковой модели нейрона. Se^m_l – входной синапс l , связанный с сегментом дендрита D^j ; D^j – j -й сегмент i -го дендрита; B^k – k -й сегмент тела нейрона

Полагаем, что нейроны обмениваются информацией через события (возникновение спайков), которые можно представить по формуле:

$$x_i = \begin{cases} 1, & t \in [t_i; t_i + \Delta t] \\ 0, & t \notin [t_i; t_i + \Delta t], \end{cases} \quad (1)$$

где x_i – выход нейрона в i -й интервал времени, а t – время.

Представленная структурная организация модели нейрона позволяет проводить расчет систем дифференциальных уравнений для каждого нейрона независимо, поскольку нейроны обмениваются исключительно информацией о моменте времени возникновения спайка, а входной вектор системы уравнений модели нейрона формируется внутри модели как функция от моментов времени прихода спайков.

Система в целом характеризуется набором из следующих гиперпараметров: размер нейрона N_s (число сегментов сомы), множество длин дендритов N_d и число возбуждающих и тормозных си-

напсов $N_{\text{суп}}$ для каждого сегмента мембраны. Их значения определяют структуру системы, которая формирует требуемую реакцию нейрона на входные воздействия.

Настоящая статья не ставит своей задачей подробное математическое описание использовавшейся модели нейрона. Такое описание можно найти в работе [3].

Отметим возможности рассмотренной модели нейрона, играющие существенную роль при решении задачи ее структурного обучения:

- создание произвольного числа сегментов тела нейрона, что означает возможность изменять размерность входного паттерна импульсов;

- независимое наращивание длин дендритов. Увеличение длины дендрита приводит к временной задержке сигнала и к уменьшению его амплитуды;

- добавление произвольного числа синапсов на произвольном участке мембраны (соме, дендрите). Добавление синапса приводит к увеличению амплитуды сигнала;

- произвольная организация связей (как возбуждающих, так и тормозных) между отдельными элементами.

Все вышеперечисленное означает возможность структурного реконфигурирования модели нейрона, что, в свою очередь, позволяет изменять время прихода и амплитуду сигнала с каждого из дендритов на сому нейрона.

В рамках решения задачи структурного обучения работа будет вестись с паттернами импульсов, под которыми будем понимать совокупность сигналов, поступающих на входы нейрона (дендриты) за некоторый промежуток времени. Отдельный входной сигнал представляет собой одиночный импульс единичной амплитуды. Соответственно отдельные сигналы в паттерне имеют одинаковую (единичную) амплитуду, но, в общем случае, различное время поступления на соответствующий вход (дендрит) нейрона. Считаем, что за определенный промежуток времени поступления паттерна на отдельном входе (дендрите) может быть зафиксировано не более одного входного сигнала.

Результатом распознавания конкретного паттерна будем считать генерацию выходного сигнала нейроном. Выходной сигнал генерируется в низкопороговой зоне нейрона (генератор потенциала действия) и представляет собой импульсы единичной амплитуды, формируемые при превышении порога величиной мембранного потенциала. Само же значение потенциала внутри низкопороговой зоны нелинейно связано с суммой сигналов, пришедших на вход нейрона. Таким образом, для преодоления порога и генерации потенциала действия необходимо максимизировать сумму вкладов в потенциал внутри низкопороговой зоны от всех дендритов, что может быть достигнуто синхронизацией действия входных сигналов в нейроне, т. е. одновременно прихода всех импульсов паттерна на тело нейрона.

Как было показано выше, синхронизация может быть достигнута путем добавления в модель отдельных сегментов дендритов. Однако это приводит к уменьшению амплитуды входного сигнала, приходящего на сому, на данном дендрите, что могло бы стать препятствием для выбора фиксированного, универсального для всех входных паттернов порога генерации. Уменьшение сигнала компенсируется добавлением синапсов на конечный сегмент дендрита, что приводит к увеличению амплитуды входного сигнала на соме.

Процедуру наращивания длины дендрита будем называть синхронизацией, тогда как процедуру добавления синапсов – нормализацией (рис. 2). Таким образом, задачей структурного обучения является максимизация потенциала внутри низкопороговой зоны нейрона путем синхронизации и нормализации, с целью вызвать генерацию потенциала действия. Процессы синхронизации и нормализации в рамках структурного обучения конкретному паттерну соответствуют обучению нейрона данному паттерну импульсов. Генерация потенциала действия при фиксированном паттерне импульсов и соответствующей ему конфигурации обученного нейрона является результатом распознавания данного паттерна импульсов.

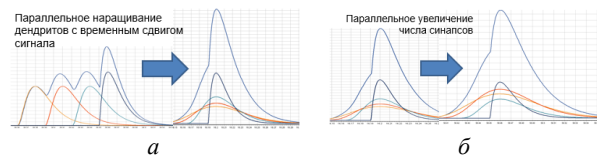


Рис. 2. Структурное обучение модели нейрона: синхронизация (а), нормализация (б)

Результаты экспериментальных исследований структурного обучения CSNM представлены в работе [4].

Выбор стратегии инкрементного обучения CSNM

Возможные стратегии инкрементного обучения CSNM приведены на рис. 3.

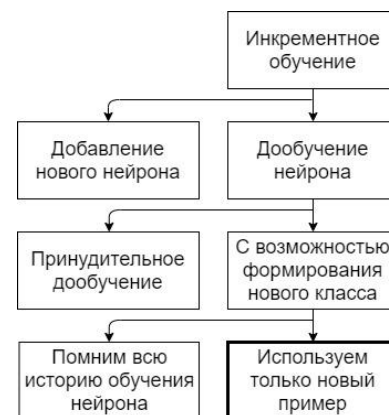


Рис. 3. Стратегии инкрементного обучения CSNM

Как было указано выше, в процессе структурного обучения CSNM происходит изменение длины дендритов и количества синапсов на конечном сегменте каждого из них. С точки зрения задачи

машинного обучения, число дендритов нейрона соответствует числу признаков, описывающих классифицируемый объект. В результате такого обучения нейрон приобретает способность отвечать на паттерн импульсов, которому он ранее был обучен (либо близкий к нему паттерн).

Таким образом, первым очевидным решением при реализации инкрементного обучения на CSNM является следующее: при необходимости включить новый паттерн импульсов в обучающую выборку некоторого класса A создается новый нейрон, обучающийся данному паттерну. Однако это решение имеет очевидный недостаток: при неограниченном росте обучающей выборки размер сети будет неограниченно расти, что может быть неприемлемо с точки зрения производительности системы.

Тем не менее использование CSNM позволяет предложить альтернативные варианты инкрементного обучения.

Так как обученная некоторому паттерну импульсов модель нейрона характеризуется тремя гиперпараметрами – числом сегментов сомы N_s (количество признаков), множеством длин дендритов N_d и числом синапсов N_{syn} для каждого сегмента мембраны – дообучение нейрона новому обучающему паттерну импульсов может быть реализовано путем вычисления среднего значения гиперпараметров N_d и N_{syn} у нейрона до переобучения и теми значениями N_d и N_{syn} , которые нейрон мог бы приобрести, независимо обучившись новому паттерну импульсов. Однако и этот подход имеет очевидные недостатки: во-первых, обучение новому паттерну импульсов происходит принудительно, т. е. не оценивается близость нового паттерна импульсов к классу A с точки зрения целесообразности его включения в обучающую выборку. Во многих случаях более целесообразным может оказаться создание нового класса на основе вновь поступившего паттерна. А во-вторых, предложенный алгоритм выглядит громоздко из-за необходимости промежуточного обучения нейрона новому паттерну, что может значительно снизить производительность алгоритма.

Рассмотрим вариант инкрементного обучения, позволяющий преодолеть указанные недостатки.

Пусть CSNM была обучена некоторому обучающему паттерну импульсов a , описывающему некоторый класс A . Пусть далее на вход CSNM подан некоторый новый паттерн импульсов b . Рассмотрим процесс переобучения CSNM из состояния, соответствующего примеру a , в состояние, соответствующее примеру b (подробное алгоритмическое описание процесса переобучения CSNM описано в [5]).

Для иллюстрации используем два простых синтетических примера. Пусть объект задается лишь двумя признаками p_1 и p_2 . Пусть в первом примере обучающему паттерну импульсов a соответствуют значения параметров $p_1 = 0, p_2 = 0$; а новому паттерну импульсов b соответствуют значения параметров $p_1 = 0,12, p_2 = 0,04$ (рис. 4, a).

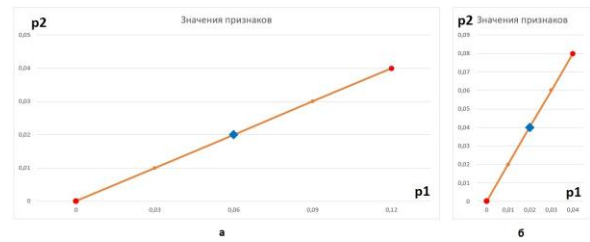


Рис. 4. Процесс переобучения нейрона: примеры 1 (a) и 2 (b)

В процессе переобучения CSNM на каждом шаге будем измерять экстремумы значения внутриклеточного потенциала при подаче на вход CSNM примера a и примера b . На рис. 5, a приведены графики полученных значений, тогда как на рис. 5, b – их суммарное значение.

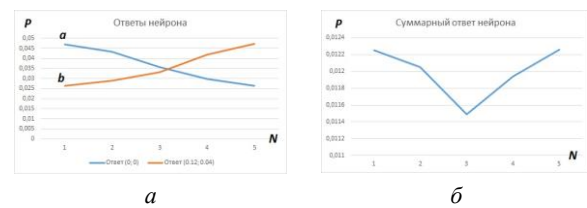


Рис. 5. Первый пример. Изменение экстремума внутриклеточного потенциала: отдельно для примеров a и b (a), суммарно (b)

Как видно из рис. 5, b , максимальные значения экстремумов внутриклеточного потенциала достигнуты в начальной и конечной точке переобучения. Такая ситуация выбирается нами в качестве естественного критерия формирования нового класса B на основе обучающего примера b .

Во втором примере обучающему паттерну импульсов a соответствуют значения параметров $p_1 = 0, p_2 = 0$; тогда как новому паттерну импульсов b соответствуют значения параметров $p_1 = 0,04, p_2 = 0,08$ (рис. 4, b).

На рис. 6, a приведены графики полученных значений экстремумов внутриклеточного потенциала при подаче на вход CSNM примера a и примера b , тогда как на рис. 6, b – их суммарное значение.

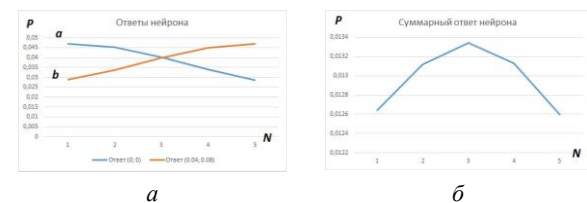


Рис. 6. Второй пример. Изменение экстремума внутриклеточного потенциала: отдельно для примеров a и b (a), суммарно (b)

Как видно из рис. 6, b , максимальное значение экстремумов внутриклеточного потенциала достигнуто в промежуточной точке переобучения. Такая ситуация выбирается нами в качестве критерия выбора конфигурации CSNM, соответствующей данной точке как оптимальной для учета обоих примеров – a и b . Это и является целью инкрементного обучения модели CSNM.

Эксперимент по решению задачи классификации при инкрементном обучении CSNM

Эксперимент проводился на наборе данных *Iris* [6]. Для эксперимента были выбраны примеры 51 и 61, расположенные в противоположных частях второго класса так, что среднее арифметическое примеров располагается рядом с центром класса, получаемым как среднее арифметическое всех примеров класса (рис. 7).

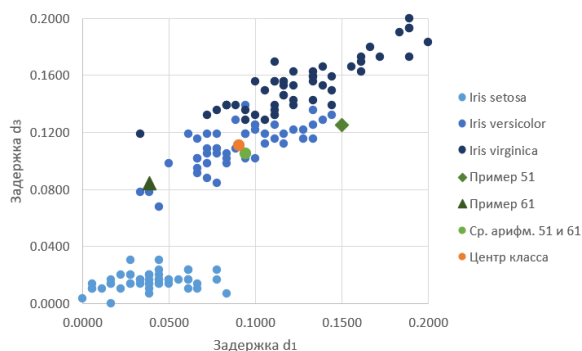


Рис. 7. Проекция набора данных *Iris*, преобразованного в паттерны

В ходе эксперимента после обучения CSNM первому паттерну модель начинает обучаться второму паттерну. В процессе переобучения на каждой итерации производится решение задачи бинарной классификации использовавшегося набора данных полученной структурой нейрона до тех пор, пока CSNM полностью не обучится второму паттерну.

Результаты эксперимента представлены на рис. 8. Динамика количества неверных ответов модели показывает, что до 6-й итерации обучения включительно модель расширяет объем знаний о втором классе за счет изучения 61-го примера. Однако после 6-й итерации структура модели становится все более непохожей на структуру после изучения 51-го примера, поэтому происходит забывание знаний 51-го примера о втором классе, результаты распознавания ухудшаются и постепенно принимают уровень примера 61.

Эксперимент показывает, что возможно объединение знаний двух примеров и даже получение лучших результатов, чем могли бы быть получены при изучении среднего арифметического исходных паттернов. Однако результаты обучения несколькими примерами напрямую зависят от структуры набора данных и выбора примеров в нем, поскольку обучение позволяет объединить знания выбранных примеров и является зависимым от способности выбранных примеров описывать свой класс.

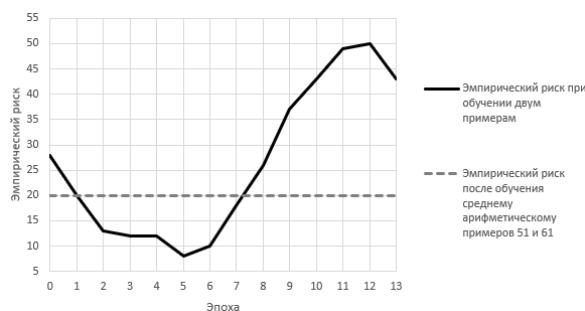


Рис. 8. Количество неверных ответов при распознавании всего набора данных

Заключение

В статье представлен способ реализации инкрементного обучения на сегментной спайковой модели нейрона. В качестве сценария инкрементного обучения выбрано дообучение одного нейрона с возможностью формирования новых классов. При обучении использовался только новый пример, без знания всей предыдущей обучающей выборки. В качестве недостатка такого подхода необходимо отметить проблему вытеснения старых знаний новыми, которую принято называть катастрофическим забыванием. Решение данной проблемы является перспективным направлением работ по данной тематике.

Работа проводилась в рамках выполнения в ЦНИИ РТК государственного задания Минобрнауки России на 2023 год: «Исследование и разработка биоподобной системы управления поведением мобильных роботов на базе энергоэффективных программно-аппаратных нейроморфных средств» (FNRRG-2022-0016 1021060307690-3-1.2.1;2.2.2).

Литература

1. Gepperth A., Hammer B. Incremental learning algorithms and applications // European Symposium on Artificial Neural Networks (ESANN). Bruges, Belgium, 2016.
2. Lobo J.L., Lana I., Del Ser J., Bilbao M.N., Kasabov N. Evolving Spiking Neural Networks for online learning over drifting data streams // Neural Networks. 2018. V. 108. P. 1–19.
3. Бахшиев А.В., Демчева А.А. Сегментная спайковая модель нейрона // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2021. Труды VII Всероссийской конференции. 2021. С. 26–29.
4. Korsakov A., Astapova L., Bakhshiev A. The Method of Structural Adaptation of the Compartmental Spiking Neuron Model // Lecture Notes in Networks and Systems, 2023. V. 460 LNNS. P. 545–553.
5. Eremenko E.A., Korsakov A.M., Bakhshiev A.V. The incremental learning algorithm for compartmental spiking neuron model // Journal of Physics: Conference Series. 2022. V. 2388(1). P. 012036.
6. UCI Machine Learning Repository: Iris Data Set. — URL: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/iris> (дата обращения: 15.03.2023).

Формализация определения информации в области компьютерных наук

О.А. Кузенков

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
kuzenkov_o@mail.ru

Понятие информации является одним из важнейших в современном обществе. Однако в настоящее время отсутствует научный консенсус относительно строгого определения ее сущности. Объясняется это ее чрезвычайной широтой и многозначностью. Сейчас термин «информация» используется не только в точных, но и в гуманитарных науках. Исчерпывающе определить его строго в текущий момент не представляется возможным [1]. Продолжают появляться новые подходы к определению информации [2, 3]. Сложилось философское направление, посвященное ее изучению [4–7]. В силу трудностей, связанных с универсальным пониманием информации, предпринимаются попытки дать точное определение этого термина для частных отраслей знания [8].

Особое системообразующее значение понятие информации имеет для сферы цифровой культуры, компьютерных наук, кибернетики. Однако и в этой области точных наук нет строгого однозначного определения данного термина.

Понятие информации было введено в широкий научный обиход Шенноном, создавшим математическую теорию информации. Но в этой теории не было дано определение информации, рассматривалась лишь ее количественный аспект. Здесь аксиоматически вводится энтропия как функция от распределения вероятности, и количество информации определяется как разность значений этой функции. Заметим, что при таком подходе информация неразрывно связывается с вероятностью, что дает повод рассматривать теорию информации как частный случай теории вероятностей. Именно такое понимание приводится в классическом вузовском учебнике по теории вероятностей: «Теория информации представляет собой не просто прикладную науку, в которой применяются вероятностные методы исследования, а должна рассматриваться как раздел теории вероятностей» [9]. Такой подход существенно ограничивал смысл информации и возможности ее применения в ряде прикладных областей, таких как геоинформатика, и справедливо критиковался рядом выдающихся ученых, в частности А.Н. Колмогоровым, который дал определение информационной сложности без использования случайных процессов [10–12]. Д.С. Чернавский стремился отказаться от вероятности как базиса для определения информации и понимал информацию как выбор [13]. Но полноценной формальной теории информации на основе такого подхода построено не было. Дополнительные сложности в однозначном понимании информации в области компьютерных наук вносит приобретающий все

большее значение феномен квантовой информации.

В базовых учебниках по информатике часто пытаются объяснить информацию как сведения, сообщения, сигналы [14–16]. Но такое объяснение вовсе не раскрывает сущность понятия, а только заменяет один неопределенный термин на другой. Иногда это понятие никак не определяется, ограничиваются лишь интуитивным пониманием его. При этом говорится, что понятие информации является неопределимым, подобно основным математическим понятиям «точка» или «множество». Но такая аналогия не является корректной, поскольку неопределимые понятия математики вводятся через систему аксиом, однозначно определяющих их свойства по отношению друг к другу. А для информации никаких аксиом не задается. Порой информация отождествляется с данными, последние понимаются как некоторый набор чисел. Однако такая редукция не позволяет понять сущность, значение и роль информации в разнообразных информационных системах.

Наблюдается явное методологическое противоречие. Разработка и применение современных информационных технологий требует точности, логической обоснованности, строгости в исследовании, но при этом в основе теоретических разработок лежит размытое внутренне противоречивое, интуитивное понятие. В связи с этим актуальной является задача выработки достаточно точного и корректного определения информации, возможно не универсального и общенаучного, но обеспечивающего потребности компьютерных наук.

Цель настоящего исследования состоит в формировании корректного понимания информации в области компьютерных наук и создания математических средств для ее определения.

Предлагаемое определение строится с учетом двух важнейших математических преобразований, связанных с пониманием информации: **выделение** некоторого подмножества (выбор, сокращение альтернатив, сокращение множества допустимых состояний и т. п.) и **отображение** между множествами (кодирование, сжатие, копирование и т. д.).

Ключевым моментом в понимании информации является процедура выделения подмножества – сокращение числа возможных альтернатив, уменьшение количества допустимых состояний. Получение информации неразрывно связано с сокращением множества альтернатив – выбором варианта, реализация исхода, уменьшение числа возможных состояний и т. п. Рассмотрим в качестве примера шахматную фигуру. Если известно ее

положение (клетка) на шахматной доске, то согласно формуле Хартли это соответствует получению $\log_2 64 = 6$ бит информации. Обратим внимание, что количество информации будет одним и тем же независимо от того, стоит ли фигура в клетке e2 или в клетке c4. Но информация о положении фигуры в этих случаях будет разной. Аналогично этому количество информации, передаваемое фразой «казнить нельзя помиловать», не зависит от того, в каком месте расположена запятая, но смысл информации при изменении ее положения меняется на противоположный. Отсюда видно, что смысл информации, по существу, ассоциируется с реализацией одной альтернативы из исходного множества. Такое понимание смысла информации отражено в известных подходах к ее определению: «Информация есть запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных» [13].

Однако возможна ситуация, когда известно не положение фигуры, а лишь вертикальный ряд, в котором она располагается, например, «е». Такое знание также соответствует обладанию информацией, количество которой в этом случае равно лишь 3 бит. Смысл этой информации заключается в реализации одной альтернативы среди восьми возможных вертикальных рядов или в сокращении множества возможных положений фигуры до восьми клеток вертикального ряда «е». Информация содержательно соответствует не количественному уменьшению мощности множества исходов, а самому остающемуся подмножеству. Следуя этому подходу, информацию можно понимать как выделенное подмножество по отношению к исходному множеству различных допустимых состояний. Идея такого определения информации была дана Н. Винером в 1960 году. Отвечая на вопрос, что такое информация, он ответил: «Если у нас имеется множество и имеется подмножество над этим множеством, тогда... информация заключена в этом подмножестве» [17].

Выделяемое подмножество можно формально математически определить с помощью показателя присутствия элемента во множестве. Для формализации выделенного подмножества A из Y в математике используется характеристическая функция χ :

- $\chi(y) = 1$, если y принадлежит A ;
- $\chi(y) = 0$, если y не принадлежит A .

Числовая величина χ является индикатором принадлежности, показателем присутствия элемента в выделяемом подмножестве, показателем выделения.

Наряду с такой характеристической функцией можно рассматривать более общий случай, когда величина χ может принимать промежуточные значения от 0 до 1. Математически такой случай соответствует заданию подмножества A как нечеткого множества. Подобная ситуация встречается и при работе с информацией. Например, изображение прямоугольного объекта на фотографии может быть недостаточно контрастным из-за неправильной фокусировки, в силу чего границы

изображения становятся размытыми и не позволяют точно знать пространственные координаты объекта.

Для математического удобства всегда можно перейти к нормированной характеристической функции, то есть функции, сумма значений которой равна единице: $\sum_{y \in Y} \chi(y) = 1$. Например, если известен вертикальный ряд для положения шахматной фигуры, то нормированная характеристическая функция этого множества имеет следующие значения: $\chi(e1) = \chi(e2) = \dots = \chi(e8) = 1/8$ и $\chi = 0$ для остальных клеток доски. Если информация о положении фигуры не была получена, и множество допустимых состояний содержит все клетки, то характеристическая функция равна $1/64$ для каждой клетки.

В качестве показателя присутствия элемента в подмножестве можно использовать вероятность реализации той или иной альтернативы, тогда все рассуждения будут соответствовать классической схеме математической теории информации. Но возможны и другие способы определения показателя присутствия. Например, в биологических системах таким показателем может служить численность или удельная численность вида, биомасса или удельная биомасса популяции; в экономических системах в качестве такого показателя можно взять удельный спрос на товар и т. п. [18]. В общем случае имеем распределение показателя принадлежности по исходному множеству Y .

Можно ввести функцию энтропии распределения по классической формуле Шеннона:

$$H = \sum_{y \in Y} \chi(y) \log_2 \chi(y).$$

Энтропия количественно выражает степень равномерности распределения показателя присутствия; ее уменьшение соответствует концентрации распределения, увеличению степени выделения некоторого подмножества. Выделение подмножества – это переход от начального распределения показателя присутствия к новому с увеличением степени концентрации. Фактически это итоговое распределение будет формализацией информации. Информация понимается как результат выделения некоторого подмножества из исходного множества элементов.

Это дает возможность содержательного понимания информации, в отличие от ее количественного измерения, которое рассматривается в классической теории информации. Следует отметить, что при таком подходе информация может рассматриваться как результат процесса отбора, для описания которого существует разработанный математический аппарат на основе динамики меры (распределения) [19–22].

Данный подход соответствует подходу Больцмана в физике, где энтропия определяется числом возможных микросостояний, а ее снижение, то есть приобретение информации, – сокращением числа таких микросостояний.

Вторым принципиальным моментом в предлагаемом подходе к пониманию информации является использование понятия отображения. Отоб-

ражение является формальной основой для кодирования, передачи и сжатия информации. При раскрытии смысла концепции информации необходимо исходить из того, что информация является результатом отображения некоторого множества элементов (альтернатив, исходов, состояний и т. п.) в другое множество, которое может быть как натурным, так и знаковым (виртуальным). Например, таким множеством могут быть символы алфавита или двоичные числа. При этом выделение некоторого элемента из первого множества (реализация исхода или состояния) приводит к выделению соответствующего элемента из второго множества, который и представляет информацию об этом состоянии.

Можно установить соответствие между элементами двух множеств: $Y \rightarrow Z$, то есть определить отображение из Y в Z . В частности, такое соответствие устанавливается при кодировке. Например, можно представить клетки шахматной доски двоичным кодом, то есть установить соответствие между множеством клеток и множеством шестизначных двоичных чисел: $e5 \rightarrow 101101$. В этом частном случае построенное отображение будет взаимно однозначным. При этом выделение некоторого элемента из множества преобразов (реализация исхода или состояния) приводит к выделению соответствующего элемента из множества образов.

Для корректного определения операции выделения в общем случае необходимо задать отображение не только для элементов множеств, но также и для распределений показателя присутствия $\chi_Y \rightarrow \chi_Z$. Увеличение неоднородности в одном распределении должно приводить к увеличению неоднородности другого распределения (концентрации распределения на некотором подмножестве). Если, например, фигура занимает на шахматной доске положение $e5$, то соответствующее распределение показателя имеет для этой клетки значение единица $\chi_Y(e5) = 1$ и значение ноль для всех остальных клеток. Предположим, что информация, полученная об этом состоянии шахматной фигуры, неполна и известен лишь вертикальный ряд «е», на котором находится фигура. Это означает, что образом распределения χ_Y будет распределение χ_Z , имеющее значение $1/8$ для клеток данного ряда: $\chi_Z(e1) = \chi_Z(e2) = \dots = \chi_Z(e8) = 1/8$, и равное нулю на остальных клетках доски.

Таким образом, полученная информация – это результат отображения, приводящего к выделению некоторого подмножества из совокупности образов (увеличению неоднородности распределения показателя присутствия).

Предлагаемое понимание информации согласуется с другими известными формальными подходами, использующимися в области компьютерных наук. Известно, что понятие распределения существенно используется в квантовой информации. Единицу квантовой информации – кубит – можно понять как комплекснозначное распределение или распределение на сфере Блоха. Операции с квантовой информацией можно понимать

как преобразования (отображения) распределений [23].

Информационная сложность двоичной строки по Колмогорову – это длина кратчайшей программы, которая производит данную строку на универсальной машине Тьюринга [10]. В этом определении можно заметить использование двух распределений, одно из которых (программа машины Тьюринга) генерирует второе – двоичную строку, то есть фактически рассматривается отображение между двумя распределениями. При этом свойства (неоднородность) образа характеризуются некоторыми свойствами прообраза (количеством операторов).

Предлагаемое определение информации согласуется с современными общенаучными подходами к ее пониманию. Согласно Д. Касагранду, информация – это любой тип паттерна (режим, образец, шаблон, узор-распределение), который влияет на формирование или преобразование других паттернов [24]. Здесь можно видеть отображение одного распределения в другое.

В рамках еще одного подхода информация понимается как сигнал [25]. Сигнал – это низкоэнергетический вход в систему, который не является значимым для обеспечения системы энергией, но связан с распределением значимых источников энергии и может использоваться для прогнозирования поступления энергии на высокоэнергетических входах в более позднее время. Здесь снова можно заметить отображение распределения значимых энергетических источников в распределение энергии слабого источника.

Таким образом, в результате проведенного исследования предложено понимание информации как результата отображения, при котором выделение подмножества из одного множества приводит к выделению соответствующего подмножества в другом множестве. Предлагаемое объяснение информации позволяет сделать это понятие достаточно строгим, что дает возможность его использования в области компьютерных наук. Подобный подход к пониманию информации был внедрен в учебный процесс ННГУ при изучении дисциплин «Теория информации» и «Математические модели процессов отбора» [26–28] (изучаемых на втором и третьем курсах бакалавриата по направлению «Фундаментальная информатика и информационные технологии»).

Литература

1. Информационный подход в междисциплинарной перспективе (материалы «круглого стола») // Вопросы философии. 2010. № 2. С. 84–122.
2. *Vigo R.* Representational information: a new general notion and measure of information // *Information Sciences*. 2011. V. 181. P. 4847–4859.
3. *Deutsch D., Marotto C.* Constructor theory of information // *Proc. R. Soc. A*. 2015. V. 471. P. 20140540.
4. *Floridi L.* What is the philosophy of information? // *Metaphilosophy*. 2002. Vol. 33. № 1–2. P. 123–145.
5. *Лю Ган.* Философия информации и основы будущей китайской философии науки и техники // Вопросы философии. 2007. № 5. С. 45–57.

6. *Adriaans P.* Handbook of the philosophy of science / *Adriaans P., van Benthem J.* (eds.) Vol. 8. Philosophy of information. North Holland, 2008. P. 3–26.
7. *Коллин К.К.* Философия информации: структура реальности и феномен информации // *Метафизика*. 2013. № 4 (10). С. 61–84.
8. *Dittrich T.* The concept of information in physics: an interdisciplinary topical lecture // *Eur. J. Phys.* 2015. V. 36. P. 015010.
9. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М. : Физматгиз, 1962.
10. *Колмогоров А.Н.* Три подхода к определению понятия «количество информации» // *Проблемы передачи информации*. 1965. Т. 1, № 1. С. 3–11.
11. *Колмогоров А.Н.* Комбинаторные основания теории информации и исчисления вероятностей // *УМН*. 1983. Т. 38, вып. 4. С. 27–36.
12. *Мазур М.* Качественная теория информации. М. : Мир, 1974. 238 с.
13. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. М. : Наука, 2001.
14. *Беляев М.А., Малинина Л.А., Лысенко В.В.* Основы информатики: учебник для вузов. М. : Феникс, 2006.
15. *Симонович С.В.* Информатика. Базовый курс: Учебник для вузов. 3-е изд. Стандарт третьего поколения. СПб. : Питер, 2011. 640 с.
16. *Макарова Н.В., Волков В.Б.* Информатика: Учебник для вузов. СПб. : Питер, 2011. 576 с.
17. Из истории кибернетики / Редактор-составитель Я.И. Фет. Новосибирск : Гео, 2006.
18. *Kuzenkov O., Morozov A.* Towards the Construction of a Mathematically Rigorous Framework for the Modelling of Evolutionary Fitness // *Bull. Math. Biol.*, 2019. V. 81(11). P. 4675–4700.
19. *Кузенков О.А.* Исследование динамической системы вероятностных мер Радона // *Дифференциальные уравнения*. 1995. Т. 31. № 4.
20. *Kuzenkov O., Ryabova E.* Variational Principle for Self-replicating Systems // *Math. Model. Nat. Phenom.* 2015. V. 10, № 2. P. 115–128.
21. *Kuzenkov O. A., Novozhenin A. V.*, Optimal control of measure dynamic // *Comm. Nonlinear. Sci. Numer. Simulat.* 2015. V. 21 (13). P. 159–171.
22. *Sandhu S., Morozov A., Kuzenkov O.* Revealing Evolutionarily Optimal Strategies in Self-Reproducing Systems via a New Computational Approach // *Bull. Math. Biol.*, 2019. V. 81 (11). P. 4701–4725.
23. *Heйман фон Дж.* Математические основы квантовой механики. М. : Наука, 1964.
24. *Casagrande D.* Information as verb: Reconceptualizing information for cognitive and ecological models // *Journal of Ecological Anthropology*. 1999. V. 3 (1). P. 4–13.
25. *Dusenbery D.B.* Sensory Ecology. New York : W.H. Freeman, 1992.
26. *Кузенков О.А., Кузенкова Г.В., Киселева Т.П.* Компьютерная поддержка учебно-исследовательских проектов в области математического моделирования процессов отбора // *Образовательные технологии и общество*. 2019. Т. 22, № 1. С. 152–163.
27. *Кузенков О.А., Кузенкова Г.В., Киселева Т.П.* Использование электронных средств обучения при модернизации курса «Математическое моделирование процессов отбора» // *Образовательные технологии и общество*. 2018. Т. 21, № 1. С. 435–448.
28. *Кузенков О.А.* Изучение концепции информации студентами ИТ-направлений // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2023. Т. 19, № 1.

Нейроморфная архитектура обработки данных, основанная на гибридной схеме использования спайковой нейронной сети и алгоритма машинного обучения

А.А. Лебедев, С.В. Стасенко

Лаборатория перспективных методов анализа многомерных данных ННГУ им. Н.И. Лобачевского, stasenko@neuro.nnov.ru

Развитие новых методов и подходов обработки информации, основанных на принципах работы мозга, является важной задачей современной нейродинамики и нейроинформатики. В последние годы растет интерес к пониманию нейронного кодирования в контексте импульсных нейронных сетей (SNN), которые представляют собой вычислительные модели, основанные на биологически релевантных моделях нейронов.

Одним из важных аспектов нейронного кодирования в SNN является представление информации с помощью последовательностей импульсов. Для интерпретации процессов кодирования информации были предложены различные подходы, основанные на экспериментальных исследованиях мозга, включая кодирование частоты, временное кодирование и пачечное кодирование [1]. В нашей работе мы использовали спайковое кодирование входного сенсорного стимула в импульсной нейронной сети на основе модели нейрона LIF [2] как новую метрику для задачи классификации.

Чтобы исследовать проблему выделения пространства признаков с помощью спайковой нейронной сети, мы выбрали базу данных MNIST [3]. Каждое изображение в наборе данных представляет собой одноканальную квадратную матрицу, состоящую из 784 пикселей, каждый из которых кодируется одним байтом. В качестве метрики для выделения признакового пространства и решения задачи классификации нами было выбра-

но количество спайков тормозного слоя нейронной сети за время стимуляции изображением следующим способом: подача изображения – 350 мс; период молчания – 150 мс.

В результате были созданы и протестированы 4 конфигурации модели спайковой нейронной сети с различными конфигурациями синаптических пластичностей. В качестве результата была построена сравнительная таблица точностей классификации серии из 1000 изображений из 3 классов: «0», «1» и «8». Классификация производилась алгоритмом Random Forest с ограничением на максимальную глубину дерева – 4.

Было получено, что наилучшая точность классификации 3 классов изображений достигается при конфигурации модели только с возбуждающей STDP, а наихудшая при наличии только тормозной STDP.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Нижегородской области для молодых ученых (соглашение № 316-06-16-111a/23 от 4 июля 2023 г.).

Литература

1. Guo W., Fouda M.E., Eltawil A.M., Salama K.N. // *Frontiers in Neuroscience*. 2021. V. 15. P. 638474.
2. Börgers C. *An introduction to modeling neuronal dynamics*. Berlin : Springer. 2017. 445 p.
3. Deng L. // *IEEE signal processing magazine*. 2012. V. 29, № 6. P. 141.

STDP-подобная модель синаптической пластичности для реализации временного и частотного кодирования

С.А. Лобов^{1,2}, В. Степасюк¹

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, lobov@neuro.nnov.ru

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

Введение

Предполагается, что ассоциативное обучение в нейронных сетях мозга основано на синаптической пластичности хеббовского типа, при которой эффективность связей между нейронами повышается при их скоррелированной активности [1]. Необходимо отметить, что хеббовская пластичность является локальным правилом обучения, в отличие от большинства глобальных алгоритмов обучения с учителем, разработанных для искусственных нейронных сетей. Одной из экспериментально подтвержденных форм хеббовской пластичности является STDP – пластичность, зависящая от времени спайков [2]. В условиях *in vitro* (срезы гиппокампа и культуры нейронов) показано, что синаптическая связь между двумя нейронами потенцируется, если постсинаптический нейрон генерирует спайк через короткое время (несколько миллисекунд) после прихода спайка от пресинаптического нейрона и ослабляется в противном случае [2, 3]. Изменение синаптической эффективности (веса связей в моделях) при STDP обычно описывают экспоненциальными зависимостями от временной разности (Δt) между пост- и пресинаптическими спайками. Однако для некоторых типов нейронов наблюдаются исключения (рис. 1, пунктирная кривая).

Зависимость от времени генерации спайков в STDP позволяет реализовать временное кодирование в моделях нейронных сетей мозга. Ранее, в модельном исследовании, нами было описано «правило кратчайшего пути» [4]: в масштабе глобальной сети STDP потенцирует наикратчайшие пути проведения возбуждения и подавляет альтернативные, более длинные пути. Этот STDP-опосредованный эффект может приводить к сетевой синхронизации в неструктурированной спайковой нейронной сети (СНС) с локальными связями [5, 6]. Основываясь на правиле кратчайшего пути, были предложены архитектуры СНС, обеспечивающие ассоциативное обучение в небольших ансамблях нейронов [4] и в модульных сетях среднего размера (сотни нейронов) [7].

Однако «классические» модели STDP в том виде, как они есть, не могут использоваться для частотного кодирования. Хотя некоторые исследования и модели воспроизводят зарегистрированные экспериментально частотно-зависимые эффекты STDP [8, 9], они сфокусированы на частоте спайков постсинаптических, но не пресинаптических нейронов. Для обучения в задаче распознавания частотного паттерна, в которой важна частота генерации спайков пресинаптическими

нейронами, авторы наряду с различными формами хеббовской пластичности явным или неявным образом включали гомеостатический компонент [10, 11].

Экспериментальным подтверждением существования пластичности, обеспечивающей частотное кодирование в нейронных сетях мозга, можно считать гетеросинаптическое ослабление (heterosynaptic LTD). Этот тип синаптического ослабления наблюдается в неактивном (низкочастотном) синапсе при индукции (путем высокочастотной стимуляции) долговременной потенциации на другом синапсе [2].

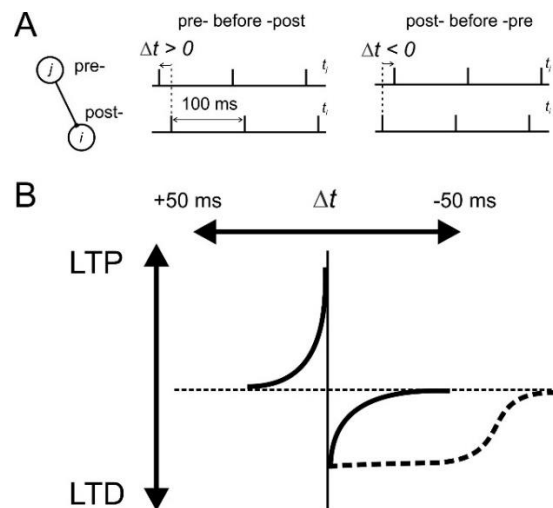


Рис. 1. STDP (с изменениями по [2]): А – протокол парной стимуляции, в котором пресинаптический нейрон многократно генерирует спайк непосредственно перед ($\Delta t > 0$) или после ($\Delta t < 0$) постсинаптического. В – в типичном случае STDP каузальная активность ($\Delta t > 0$) приводит к долговременной потенциации (LTP), тогда как акаузальная активность ($\Delta t < 0$) вызывает длительную депрессию (LTD). Штриховая линия показывает расширенное временное окно для LTD, зарегистрированное в некоторых кортикальных синапсах

Целью данной работы является разработка нового STDP-подобного правила обучения, которое с небольшими вычислительными затратами можно было бы использовать как для временного, так и для частотного кодирования в СНС.

Спайковая модель нейронной сети

Детальное описание спайковой модели нейронной сети представлено нами в предыдущих работах [4, 6]. В частности, для моделирования динамики трансмембранного потенциала использовалась модель Ижикевича [12]:

$$\frac{dv}{dt} = 0,04v^2 + 5v + 140 - u + I(t),$$

$$\frac{du}{dt} = a(bv - u), \quad (1)$$

$$\text{если } v(t) \geq 30, \text{ то } \begin{cases} v(t) \leftarrow c, \\ u(t) \leftarrow u(t) + d, \end{cases}$$

где v – мембранный потенциал, t – время, u – восстановительная переменная и $I(t)$ – внешний ток. Значение параметров соответствовало режиму «regular spiking»: $a = 0,02$, $b = 0,2$, $c = -65$ и $d = 8$ [12].

В (1) в качестве внешнего тока использовался синаптический ток:

$$I(t) = \beta \sum_{j=1}^n y_j w_j, \quad (2)$$

где β – масштабирующий коэффициент (при моделировании использовалось значение $\beta = 0,5$), n – количество пресинаптических нейронов ($n = 1$ в протоколе парной стимуляции и $n = 100$ в протоколе частотной стимуляции, см. далее), $w_j \in [0,1]$ – вес связи от пресинаптического нейрона j к постсинаптическому нейрону, и y_j – синаптическая переменная пресинаптического нейрона.

Синаптическая динамика пре- и постсинаптического нейрона описывается следующими уравнениями:

$$\frac{dy_j}{dt} = -\frac{1}{\tau_s} y_j + \sum_k \delta(t - t_k^j),$$

$$\frac{dy_i}{dt} = -\frac{1}{\tau_s} y_i + \sum_k \delta(t - t_k^i), \quad (3)$$

где $\tau_s = 10$ (мс) – характерное время синаптического ответа, $\{t_k^j\}_k$ и $\{t_k^i\}_k$ – моменты времени генерации спайков соответственно пре- и постсинаптическим нейроном.

STDP-протокол парной стимуляции

Для демонстрации возможности временного кодирования в работе использовался простой протокол парной стимуляции, использующийся в экспериментах с индукцией STDP-пластичности (рис. 1, А).

В частности, пре- и постсинаптические нейроны стимулировались с частотой 10 Гц парами импульсов, достаточных для генерации спайка. Моделирование с текущей временной разницей между пост- и пресинаптическими спайками ($\Delta t = t_i^{sp} - t_j^{sp}$) длилось 10 с и включало 100 стимулирующих пар импульсов. Временная разница Δt варьировалась от -50 мс до 50 мс с шагом 2 мс.

Для оценки синаптической пластичности использовалось изменение синаптического веса Δw после стимуляции, нормированное к исходному весу w_0 . Такой подход позволяет сравнивать модельные результаты с экспериментами, в которых изменение эффективности синапсов оценивается по нормированному изменению амплитуды возбуждающих постсинаптических потенциалов (ВПСП). При моделировании нами использовалось начальное значение веса $w_0 = 0,5$.

Частотное кодирование

На рис. 2 представлена стандартная схема частотного кодирования информации одиночным

нейроном. Постсинаптический нейрон i имеет синапсы с $n = 100$ пресинаптическими нейронами. Каждый пресинаптический нейрон генерирует спайки согласно пуассоновскому процессу с заданной средней частотой f_j в диапазоне от $0,1$ до 100 Гц. Набор $\{f_j\}$ рассматривается в качестве информационного паттерна. Таким образом, установив $\{f_j\}$, можно определить информационный контент, посылаемый постсинаптическому нейрону. Во время обучения синаптические веса w_j меняются из-за прохождения спайков через синапсы, и реакция постсинаптического нейрона на различные информационные паттерны может меняться.

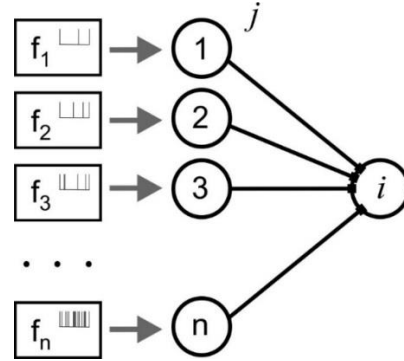


Рис. 2. Частотное кодирование пресинаптической информации. Пресинаптические нейроны посылают серии спайков с частотами $\{f_j\}_{j=1}^n$, кодируя информационный паттерн. Постсинаптический нейрон (i) получает частотный паттерн и запоминает его

Поскольку число пресинаптических нейронов n достаточно велико, нейрон можно считать многомерным. Ранее было замечено, что такие нейроны могут эффективно кодировать многомерную информацию [13]. Оценка минимальной размерности дает порог $n = 30-40$ для формальных нейронов. Для спайковых нейронов ранее были получены только предварительные результаты [11].

Модель 1. Классическое парное правило STDP

Большинство моделей STDP интерпретируют экспериментальные результаты с помощью парного правила обновления, в котором изменение синаптического веса зависит от временной разницы между парами пре- и постсинаптических спайков [3]. Парное правило можно сформулировать следующим образом:

$$\Delta w_j^+ = F^+(w_j) \exp(-\Delta t / \tau_+), \text{ if } t = t_i^{sp}, \quad (4)$$

$$\Delta w_j^- = -F^-(w_j) \exp(\Delta t / \tau_-), \text{ if } t = t_j^{sp}, \quad (5)$$

где $\Delta t = t_i^{sp} - t_j^{sp}$ – временная разница между пост- и пресинаптическим спайком, а $F^\pm(w_j)$ описывает зависимость обновления веса от текущего значения веса:

$$F^+(w_j) = \eta(1 - w_j), \quad F^-(w_j) = \eta\alpha w_j, \quad (6)$$

где η – скорость обучения, α – параметр асимметрии процессов депрессии и потенциации.

Необходимо отметить, что, согласно уравнениям (4), (5), обновление весов имеет место только в моменты времени генерации спайков: t_i^{sp} – постсинаптическим нейроном (5) ($\Delta t > 0$) и t_j^{sp} – пресинаптическим нейроном (6) ($\Delta t \leq 0$).

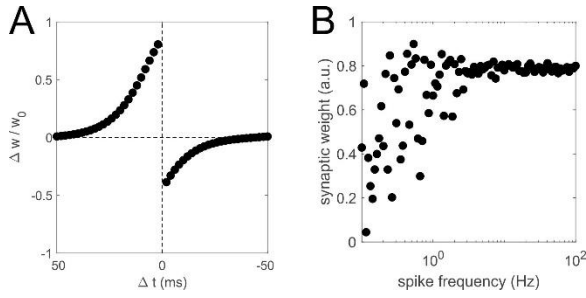


Рис. 3. Результаты моделирования при применении классического парного правила STDP: А – относительное изменение синаптического веса в зависимости от временной разницы парной стимуляции; В – синаптические веса после обучения частотному паттерну в зависимости от частоты спайков. Используемые параметры: $\tau_+, \tau_- = 10$ ms, $\eta = 0,02$; $\alpha = 0,3$

На рис. 3 представлены результаты моделирования парного правила STDP при применении протоколов стимуляции, описанных выше. Как и ожидалось, данное правило обучения не работает в контексте частотного кодирования. В частности, на частоте до насыщения, наблюдаемой ниже 10 Гц, веса могут случайным образом принимать значения от минимума до максимума. По величине веса того или иного синапса нельзя сделать однозначный вывод о частоте стимуляции этого входа. Соответственно, парное правило STDP не подходит для частотного кодирования.

Модель 2. Хеббовская пластичность с синаптическим забыванием

Согласно правилу хеббовской пластичности синаптический вес увеличивается при взаимной активности пре- и постсинаптического нейрона независимо от порядка спайков. Для предотвращения проблемы насыщения веса можно использовать так называемое синаптическое забывание, а также синаптическое масштабирование [11]. Для спайковых нейронов хеббовскую пластичность с синаптическим забыванием можно сформулировать следующим образом:

$$\frac{dw_j}{dt} = y_i(\eta y_j(1 - w_j) - \mu w_j), \quad (7)$$

где μ – скорость забывания. Последний член уравнения при $\eta = 0$ стремится ослабить синаптический вес до нуля, $w_j \rightarrow 0$; таким образом постсинаптический нейрон «забывает» информацию на неактивных синапсах.

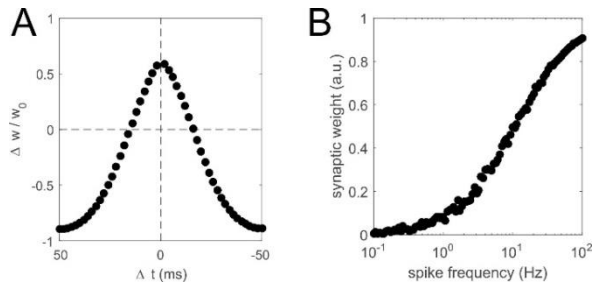


Рис. 4. Результаты моделирования при применении хеббовской пластичности с синаптическим забыванием. А и В аналогично рис. 3. Значения параметров: $\eta = 0,1$; $\mu = 0,01$

В отличие от правила STDP, хеббовская пластичность не различает порядок спайков на пре- и постсинаптическом нейроне, соответственно кривая зависимости от временной разницы симметрична (рис. 4, А). Следовательно, хеббовскую пластичность нельзя использовать во временном (или так называемом ранговом) кодировании. После обучения с частотным паттерном синаптический вес однозначно определяется частотой спайков на соответствующем входе (рис. 4, В). В результате такого обучения нейрон избирательно возбуждается выученным частотным паттерном и «молчит» при предъявлении неизвестного паттерна (подробности см. в [11]).

Модель 3. STDP с синаптическим забыванием

Для преодоления описанных ограничений STDP (невозможность частотного кодирования) и хеббовского обучения (невозможность временного кодирования) можно использовать STDP с синаптическим забыванием [10]:

$$\Delta w_j = F^+(w_j) \exp(-\Delta t/\tau_+) - \mu w_j, \text{ if } t = t_i^{SP} \quad (8)$$

$$\Delta w_j^- = -F^-(w_j) \exp(\Delta t/\tau_-), \text{ if } t = t_j^{SP} \quad (9)$$

Необходимо отметить, что, в отличие от уравнения (7), член синаптического забывания в (8) не умножается на y_j , так как обновление веса происходит, когда постсинаптический нейрон генерирует спайк (то есть находится в активном состоянии).

Результаты моделирования (рис. 5) показывают, что в данном случае возможно как временное, так и частотное кодирование. Однако можно отметить некоторые недостатки и, как следствие, необходимость компромисса в выборе параметров.

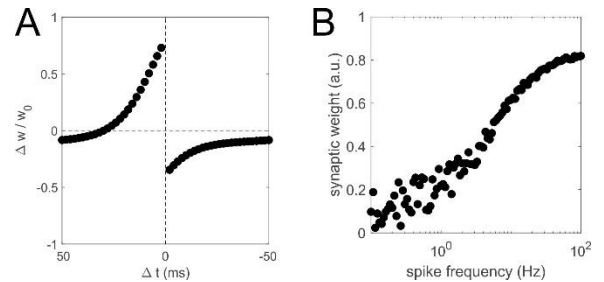


Рис. 5. Результаты моделирования STDP с синаптическим забыванием. А и В аналогично рис. 3. Значения параметров: $\tau_+, \tau_- = 10$ ms; $\eta = 0,02$; $\alpha = 0,2$; $\mu = 0,001$

В частности, член синаптического забывания в (8) сдвигает кривые STDP вниз (рис. 5, А). С одной стороны, чем выше значение μ , тем более выражено это смещение. С другой стороны, если μ уменьшается, зависящее от частоты снижение синаптических весов происходит очень медленно. Например, показанные на рис. 5, В результаты были получены после вдвое большего времени воздействия, чем на рис. 4, В (20 с против 10 с). Но и в этом случае веса в низкочастотной области не успели достичь своих асимптотических значений, о чем свидетельствует наблюдаемый разброс (рис. 5, В). Кроме того, депрессивная часть STDP (9) сдвигает кривую частотной зависимости. Учи-

тывая это, при реализации нейрокомпьютинга «конечный пользователь» нейронной сети (мозг или исследователь) должен решить, какой тип кодирования важнее в данном конкретном случае.

Модель 4. STRDP – пластичность, зависящая от времени и частоты спайков

Новая модель, STRDP (Spike Timing and Rate Dependent Plasticity), решает упомянутые выше проблемы. Синаптический вес в новом правиле обновляется только в том случае, когда *постсинаптический* нейрон генерирует спайк:

$$\Delta w_j = F^+(w_j) \cdot \exp(-\Delta t/\tau_+) - F^-(w_j)/(1 + \exp(b_- - \Delta t/\tau_-)), \quad \text{if } t = t_i^{sp}. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что здесь значение Δt всегда положительно, в отличие от парного STDP (4), (5). При небольших значениях Δt (до ~50 мс) второй член в уравнении (10) близок к нулю, и правило работает аналогично LTP в парном STDP (4). Наоборот, для больших Δt (> 50 мс) первый член в (10) близок к нулю, и наблюдаются эффект депрессии (LTD), описываемый логистической функцией. Время включения LTD зависит от параметра сдвига b_- , соответствующего такому времени, при котором эффект депрессии равен половине от максимального.

Таким образом, LTD происходит не за счет последовательности спайков *пост-пре* в ответ на парную стимуляцию, а за счет длительного времени Δt , прошедшего от пресинаптического спайка в ответ на предыдущую пару стимулов (...*пост-пре* Δt *пост-пре*...). Необходимо подчеркнуть, что LTD в STRDP зависит от частоты генерации спайков: при наличии других высокочастотных входов чем ниже частота спайков в синапсе, тем больше некоррелированные (с большим Δt) постсинаптические спайки уменьшают вес этого синапса.

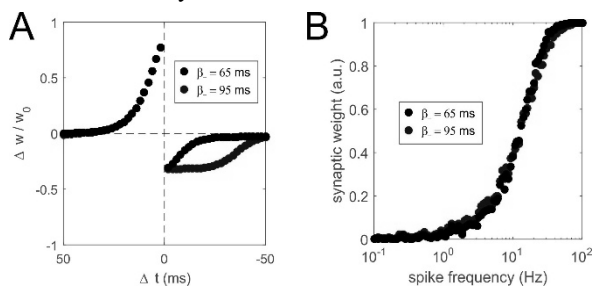


Рис. 6. Результаты моделирования STRDP. А и В аналогично рис. 3. Значения параметров: $\tau_+ = 7$ ms; $\tau_- = 5$ ms; $\eta = 0,1$; $\alpha = 0,3$

На рис. 6 представлены как STDP-подобные кривые после парной стимуляции (рис. 6, А, черные точки), так и зависящая от частоты кривая после обучения частотному паттерну (рис. 6, В). Необходимо отметить, что параметр сдвига b_- определяет форму кривой LTD. В частности, при $b_- = 65$ мс (рис. 6, А, черные точки) наблюдается LTD «классического» STDP, характерного для многих пирамидных нейронов коры и гиппокампа. При $b_- = 95$ мс (рис. 6, А, серые точки) наблюдается кривая LTD с расширенным временным окном, характерная для некоторых нейронов коры

[2]. В то же время частотная кривая (рис. 6, В) не показывает ярко выраженной разницы при различных значениях b_- и указывает на возможность частотного кодирования в диапазоне 1–40 Гц.

Заключение

В данной работе предложено новое правило обучения под названием Spike Timing and Rate Dependent Plasticity, или STRDP. STRDP обновляет синаптические веса только тогда, когда возникают постсинаптические спайки. «Знак» (то есть потенциация либо депрессия) и количественная степень пластичности зависят от времени генерации спайка пресинаптическим нейроном. Предложенное правило демонстрирует как «классическую» STDP-зависимость от временной разницы между спайками, так и возможность частотного кодирования. Кроме того, правило обеспечивает простую реализацию и может быть рассчитано в режиме онлайн во время моделирования спайковой нейронной сети. Последнее делает STRDP удобным для аппаратной реализации, например, с использованием мемристивных устройств [13].

Литература

1. *Hebb D.O.* The Organization of Behavior: A neuropsychological theory. New York: Wiley, 1949.
2. *Markram H., Gerstner W., Sjöstrom P.J.* A history of spike-timing-dependent plasticity // Front. Synaptic Neurosci. Frontiers Research Foundation, 2011. Vol. 3. P. 4.
3. *Morrison A., Diesmann M., Gerstner W.* Phenomenological models of synaptic plasticity based on spike timing // Biol. Cybern. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. Vol. 98, № 6. P. 459–478.
4. *Lobov S.A. et al.* Spatial properties of STDP in a self-learning spiking neural network enable controlling a mobile robot // Front. Neurosci. 2020. Vol. 14. P. 88.
5. *Lobov S.A. et al.* Noise Enhanced Signaling in STDP Driven Spiking-Neuron Network // Math. Model. Nat. Phenom. 2017. Vol. 12, № 4. P. 109–124.
6. *Lobov S.A. et al.* Spatial Memory in a Spiking Neural Network with Robot Embodiment // Sensors. 2021. Vol. 21, № 8.
7. *Lobov S.A. et al.* Spatial Computing in Modular Spiking Neural Networks with a Robotic Embodiment // Mathematics. 2023. Vol. 11, № 1.
8. *Izhikevich E.M., Desai N.S.* Relating STDP to BCM // Neural Comput. 2003. Vol. 15, № 7. P. 1511–1523.
9. *Pfister J.-P., Gerstner W.* Triplets of Spikes in a Model of Spike Timing-Dependent Plasticity // J. Neurosci. 2006. Vol. 26, № 38. P. 9673 LP–9682.
10. *Lobov S.A. et al.* Competitive Learning in a Spiking Neural Network: Towards an Intelligent Pattern Classifier // Sensors. 2020. Vol. 20, № 2.
11. *Stepasyuk V.Y. et al.* Synaptic scaling as an essential component of Hebbian learning // 6th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). 2022. P. 270–273.
12. *Izhikevich E.M.* Simple model of spiking neurons // IEEE Trans. Neural Networks. 2003. Vol. 14, № 6. P. 1569–1572.
13. *Makarov V.A. et al.* Toward Reflective Spiking Neural Networks Exploiting Memristive Devices // Front. Comput. Neurosci. 2022. Vol. 16.

Разработка варианта биоморфной системы визуальной навигации

Ю.А. Малышев¹, В.Г. Яхно^{1,2}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
smmalisheva@gmail.com

² Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

Способность ориентироваться в пространстве и определять положение вещей важна для выживания людей, млекопитающих и других живых систем. В последнее время исследования в области пространственного восприятия становятся предметом особого интереса нейробиологии. Данные исследования позволили понять некоторые механизмы, используемые животными в процессе навигации, и определили набор типов клеток, ответственных за обработку пространственной информации. Это позволяет приблизиться к пониманию функционирования нейронных сетей, лежащих в основе этой фундаментальной когнитивной способности.

Для изучения механизмов работы навигации в живых системах, их технических аналогах и проверки гипотез об их функционировании представляется разумным создание вычислительных моделей. Подобные модели, основанные на данных о функционировании живых систем, существуют, и называются биоморфными моделями систем навигации. Эти модели принимают на вход те же данные, которые доступны биологическим системам навигации, а на выходе дают оценку положения субъекта в пространстве относительно других объектов. Выходные данные этих систем возможно изучать статистическими методами, получая метрики качества работы систем для их сравнения.

Цель настоящей работы состоит в разработке и оптимизации биорелевантной системы визуальной навигации. В работе исследуется система визуальной навигации, являющаяся подвидом систем одновременного определения местоположения и построения карты (Simultaneous Localization And Mapping – SLAM). Функционирование таких систем ориентировано на определение текущего местоположения системы в пространстве относительно окружающих ее объектов и предыдущих местоположений, а также на составление карты окружающего пространства. Подобные алгоритмы принимают на вход данные, получаемые от различных сенсоров, установленных на подвижной системе (моно- либо стереоизображения от видеокамеры, облако точек от лидара, скорость либо ускорение от соответствующих датчиков), а на выходе выдают информацию о текущем местоположении системы на карте окружающего пространства. Как в биологических, так и в технических системах реализуется совместная работа процессов, выполняющих интеграцию пути (суммирование всех перемещений системы относительно собственных предыдущих положений) и замыкание циклов (восстановление «запомненно-

го» местоположения при попадании системы в уже известные точки пространства; при этом происходит сброс ошибки интеграции пути). Движение системы относительно предыдущих местоположений вычисляет система одометрии. В живых системах функцию одометрии выполняет вестибулярный аппарат и проприоцепция, то есть отслеживание положения частей тела относительно друг друга (например, определение длины и направления шагов).

В данной работе рассматриваются две подобные системы, работающие со входными данными в виде последовательности монокулярных изображений: RatSLAM [1, 2] и ORB-SLAM2 [3, 4]. В них вышеуказанные операции выполняются с использованием различающихся механизмов.

Система RatSLAM построена на основе биорелевантной модели визуальной навигации в гиппокампе грызунов (рис. 1). Рассматриваемая модель построена на основе данных биологических исследований, описывающих процессы навигации и составления карты в процессе движения живых систем. Интеграция пути происходит в кубической сети клеток позы – многослойной рекуррентной нейронной сети с непрерывным аттрактором, функционально подобной сетям решетчатых нейронов и нейронов направления головы в мозге грызунов. Данная сеть имеет конфигурацию трехмерного полносвязного куба, измерения которого соответствуют двум координатам (x , y) точек маршрута на плоской карте и направлению устройства (вращение относительно вертикальной оси). Текущему местоположению соответствует центроид пакета наиболее активных в данный момент клеток позы, а сигналы одометрии вызывают соответствующий сдвиг активности в кубической сети клеток позы. Замыкание циклов выполняется путем создания коллекции локальных видов – изображений, «привязанных» к точкам пространства, в которых они были получены, при помощи возбуждающих связей с соответствующей клеткой в сети клеток позы. В случае, если новое изображение, поступившее на вход системы, похоже на одно из изображений в коллекции локальных видов (значение метрики различия изображений ниже порога), активируется соответствующая возбуждающая связь, переносящая возбуждение в кубической сети клеток позы на группу клеток, связанную с данным изображением. Таким образом, в сети клеток позы выполняется однократное обучение при создании нового локального вида. Карта пространства представляет собой последовательность изображений, «нанизанных» на траекторию движения устройства.

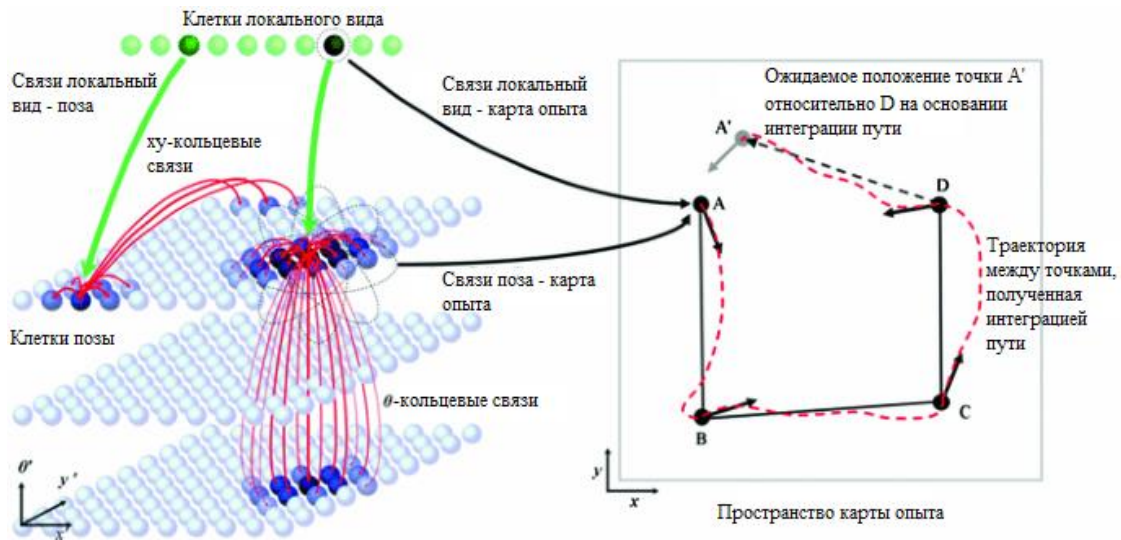


Рис. 1. Структура системы RatSLAM [2] (сверху слева – коллекция локальных видов, снизу слева – кубическая сеть клеток позы, справа – пространство карты опыта)

Данная система принимает на вход информацию от внешнего блока одометрии, определяющего движения субъекта по изменению профиля интенсивности изображения, что, по-видимому, обуславливает низкую точность одометрической информации, однако нейронная обработка данных в системе, строящая гипотезы о местоположении путем накопления сенсорных данных, позволяет ей функционировать даже при неоднозначности трактовки внешних сигналов.

Система ORB-SLAM2 представляет собой систему одновременного определения местоположения и составления карты, построенную без опоры на биологические аналоги (рис. 2). Данная система работает по принципу выделения и отслеживания изменений положения особых точек на изображении, а также идентификации конкретных особых точек [3, 4]. В данной системе производится оценка смещения точки наблюдения между последовательными изображениями в потоке, приводящая к видимому изменению

положений особых точек на изображении. Данная оценка перемещения используется как одометрическая информация. Интеграция пути выполняется при помощи прямого суммирования одометрической информации, а замыкание цикла происходит при наличии на наблюдаемом изображении определенных особых точек в определенном положении, соответствующем предыдущему положению субъекта в пространстве. Картой пространства является трехмерная траектория движения устройства внутри облака точек, представляющих собой оценку положения соответствующих особых точек в пространстве. Также на траектории выделяются ключевые кадры – изображения, на которых происходит существенное изменение в потоке выделенных особых точек.

Данная система имеет точность одометрии выше, чем модуль визуальной одометрии RatSLAM, что в том числе связано с использованием особых точек, определяемых с субпиксельной точностью.

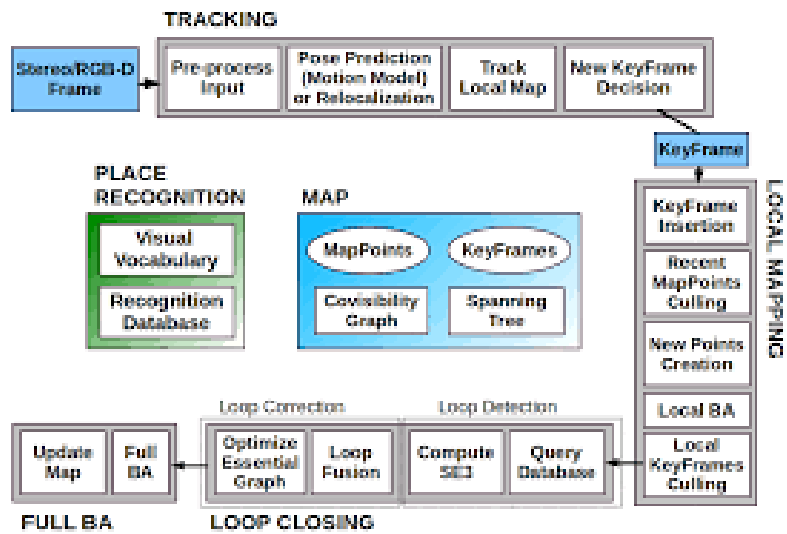


Рис. 2. Структура системы ORB-SLAM2 [4]. Сверху – вычисление одометрической информации, справа – создание коллекции ключевых кадров, снизу – замыкание циклов. В центре показано представление составляемой карты

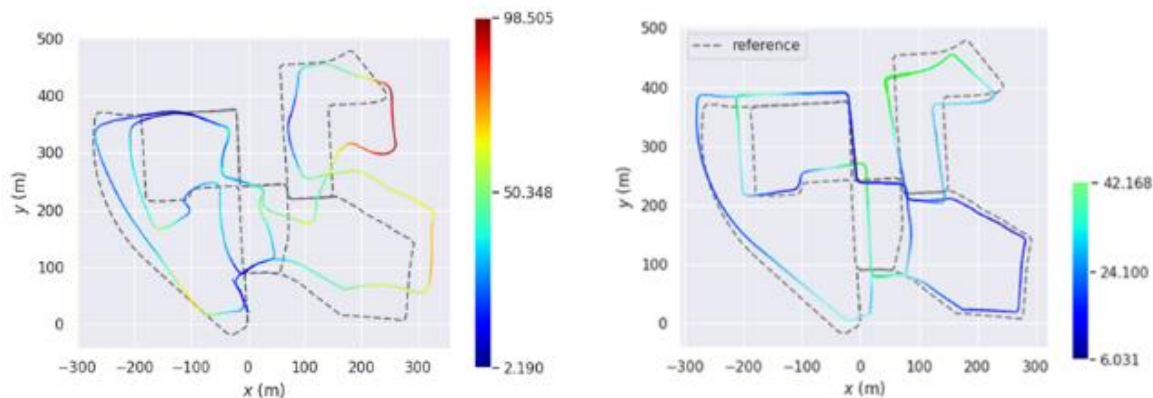


Рис. 3. Распределение абсолютной ошибки определения местоположения на траектории KITTI00 (слева – для оригинальной системы RatSLAM, справа – для новой системы). Цветной линией обозначена оценка траектории, выполненная соответствующей системой. Пунктирной линией обозначена истинная траектория)

На основе рассмотренных систем была разработана новая система визуальной навигации. Система состоит из модуля визуальной одометрии на основе системы ORB-SLAM2, а также модуля интеграции пути и замыкания циклов на основе системы RatSLAM. Это позволяет сочетать точность определения местоположения систем, работающих по принципу отслеживания особых точек на изображении, и нейроподобную обработку. С помощью построенной системы были получены оценки местоположения на открытых (KITTI) [5] и новых наборах данных, собранных одним из авторов.

Полученные оценки были сравнены с истинными данными о местоположении, были получены метрики несоответствия траекторий (абсолютная и относительная ошибки определения местоположения). Также была проведена оптимизация значений изменяемых параметров системы (рис. 3).

Построенная система визуальной навигации дает оценку местоположения субъекта в пространстве, хорошо согласующуюся с истинными данными о местоположении. В дальнейшем возможно развитие системы путем применения гиперболической модели геометрии, расширяющейся с опытом для оптимизации работы системы на

больших картах, а также включение в состав системы сети клеток, функционально подобных клеткам границы в мозгу млекопитающих, для использования информации о глубине пространства.

Литература

1. *Milford M. et al.* RatSLAM: a hippocampal model for simultaneous localization and mapping // IEEE Int. Conf. Rob. Autom. 1. V. 1. P. 403–408. 10.1109/ROBOT.2004.1307183.
2. *Ball D. et al.* OpenRatSLAM: an open source brain-based SLAM system // Autonomous Robots. 2013. 34. 1–28. 10.1007/s10514-012-9317-9.
3. *Mur-Artal R. et al.* ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system // IEEE Transactions on Robotics. 31. 1147–1163. 10.1109/TRO.2015.2463671.
4. *Mur-Artal R., Tardós J.D.* ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras // IEEE Transactions on Robotics. V. 33, № 5. P. 1255–1262. Oct. 2017. DOI: 10.1109/TRO.2017.2705103.
5. *Geigere A. et al.* Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite // 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, RI, USA. 2012, pp. 3354–3361. DOI: 10.1109/CVPR.2012.6248074.

Моделирование конкуренции языков в двуязычном сообществе

А.В. Медведев, О.А. Кузенков

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Методы математического моделирования широко применяются для изучения языковой динамики, исследованиям которой посвящено много работ [1–8]. Исследование языковой динамики и прогнозирование ее результатов становятся все более актуальными в современном мире. Центральной задачей для исследователя является выявление тенденции, когда один язык вытесняет остальные, т. е. становится доминирующим, и тем самым оказывает влияние на все сферы социальной жизни.

Цель настоящей работы заключается в построении и исследовании математической модели конкуренции языков в двуязычном сообществе, а также поиска возможной интерпретации параметра волатильности.

Рассматриваемая модель имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = c_1 r z_{12} - b_1 z_1 (z_2 + z_{12})^\alpha, \\ \dot{z}_2 = c_2 r z_{12} - b_2 z_2 (z_1 + z_{12})^\beta, \\ \dot{z}_{12} = b_1 z_1 (z_2 + z_{12})^\alpha + b_2 z_2 (z_1 + z_{12})^\beta - r z_{12}, \\ z_1 + z_2 + z_{12} = 1. \end{cases} \quad (1)$$

Численность сообщества постоянна во времени (число рождений равно числу смертей). Владение тем или иным языком не влияет на рождаемость или смертность, коэффициент r характеризует скорость смены поколений. Члены сообщества могут владеть одним из двух языков или обоими сразу. Доля членов сообщества, владеющих только первым языком – z_1 , вторым – z_2 . Доля членов сообщества, владеющих двумя языками – z_{12} (билингвы). Дети билингвов первоначально осваивают первый или второй язык с вероятностями c_1 и c_2 соответственно. Скорость процесса появления билингвизма пропорциональна произведению количеств носителей языка и индивидов, не владеющих им; коэффициенты пропорциональности b_1 и b_2 для первого и второго языков. Считается, что приобретение языка соответствует гипотезам Абрамса – Строгатти [9] и присутствует параметр волатильности для каждого языка α и β . Для взрослых людей престижность языков определяется коэффициентами – b_1 и b_2 , а для детей – c_1 и c_2 . Фазовым пространством для (1) является стандартный симплекс [10].

Аналитическое исследование проводилось на основе математического аппарата, разработанного для систем дифференциальных уравнений на стандартном симплексе [10–14], который использовался для моделирования процессов передачи генетически незакрепленной информации. В результате проведенного исследования было выявлено, что система (1) имеет 3 или 5 состояний равновесия (в зависимости от параметров). Иссле-

дование показало два возможных варианта развития динамики (рис. 1, 2).

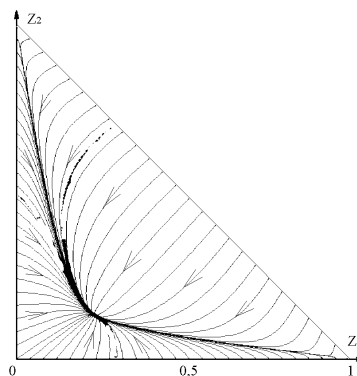


Рис. 1. Сосуществование двух языков и билингвов

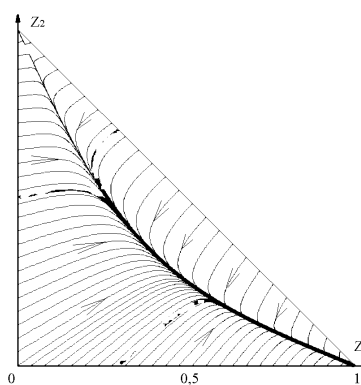


Рис. 2. Вытеснение одного языка другим

В ходе аналитического исследования модель была сведена на плоскость, а степенные члены ее правых частей аппроксимированы при помощи рядов Тейлора. В результате таких изменений модель (1) приобрела следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = c_1 r (1 - z_1 - z_2) - b_1 z_1 + \alpha b_1 z_1^2, \\ \dot{z}_2 = c_2 r (1 - z_1 - z_2) - b_2 z_2 + \beta b_2 z_2^2. \end{cases} \quad (2)$$

Исследование модели (2) выявило достоверную аппроксимацию ею изначальной модели, в связи с чем члены правых частей при коэффициентах α и β могут быть интерпретированы как взаимопомощь внутри группы носителей одного языка, а параметры волатильности (α и β) как сила этой взаимопомощи. Взаимопомощь усиливается, когда носителей языка становится мало и уменьшается, когда группа носителей растет. Модель (1) ранее применялась для описания реальных статистических данных и показала достаточно точное соответствие для различных языковых пар (рис. 3–5).

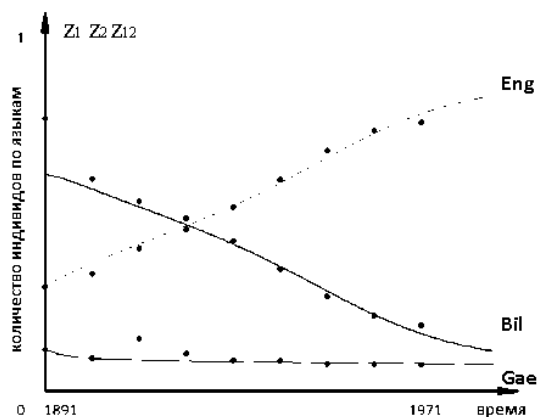


Рис. 3. Статистические данные численности английской и гэльской языковых групп за период 1891–1971 гг. При помощи моделирования получены графики кривых для численности следующих языковых групп: пунктир – английской, тире – гэльской, сплошная – билингвы

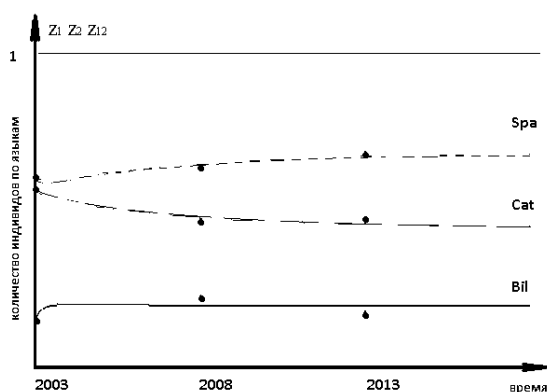


Рис. 4. Статистические данные численности испанской и каталонской языковых групп за период 2003–2013 гг. При помощи моделирования получены графики кривых для численности следующих языковых групп: пунктир – испанской, тире – каталонской, сплошная – билингвы

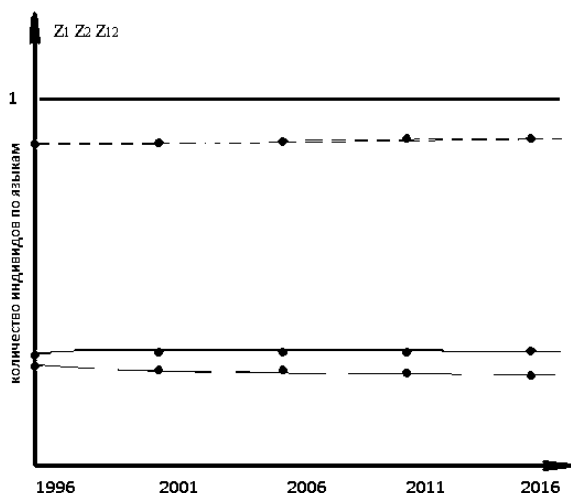


Рис. 5. Статистические данные численности французской и английской языковых групп в Канаде за период 1996–2016 гг. [15]. При помощи моделирования получены графики кривых для численности следующих языковых групп: пунктир – французской, тире – английской, сплошная – билингвы

Так же модель апробировалась на статистических данных других языковых парах, таких как

уэльско-английская, франко-голландская, бакско-испанская. Результаты апробации показали соответствие данной модели реальным данным, в связи с чем можно говорить об актуальности интерпретации параметров волатильности, полученных в рамках данной работы, и для реальной жизни.

Литература

1. *Castelly X., Egunluz V., San Miguel M.* Ordering Dynamics with Two Non-Excluding Options: Bilingualism in Language Competition // *New Journal of Physics*. 2006, № 8. P. 308.
2. *Mira J., Paredes B.* Interlinguistic Similarity and Language Death Dynamics // *EPL (Europhysics Letters)*. 2005. V. 69. P. 1031.
3. *Baggs I., Freedman H.* A mathematical model for the dynamics of interactions between a unilingual and a bilingual population: persistence versus extinction // *J. Math. Sociology*. 1990. 16 (1) : 51–75.
4. *Wyburn J., Hayward J.* The future of bilingualism: an application of the Baggs and Freedman model // *Math. Sociology*. 2008. V. 32, № 4. P. 267–284.
5. *Diaz M., Switkes J.* A mathematical model of language preservation // *Heliyon*. 2021. V. 7, № 5.
6. *Alexandrova N.* The disappearance of languages, natural bilingualism and nonlinear dynamics // In: 8th International Conference on Cognitive Science. P. 35–37, Svetlogorsk, Russia, 2018. Abstracts.
7. *Alexandrova N., Antonets V., Kuzenkov J., Nuidel I., Shemagina V., Yakhno V.* Bilingualism as an Unstable State // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. V. 1358. Springer, Cham.
8. *Hofbauer J., Sigmund K.* Evolutionary game dynamics, *Bull. (New Series) // American Math. Soc.*, 40:4 (2003), 479–519.
9. *Abrams D., Strogatz S.* Modelling the Dynamics of Language Death // 2003. *Nature*, 424. 900.
10. *Kuzenkov O., Ryabova E.* Optimal control of a hyperbolic system on a simplex // *Journal of computer and systems sciences international*. 2003. V. 42, № 2. P. 227.
11. *Kuzenkov O.* The investigation of the population dynamics control problems based on the generalized Kolmogorov model // *Journal of computer and systems sciences international*. 2009. V. 48, № 5. P. 839–846.
12. *Kuzenkov O., Ryabova E.* Optimal control for a system on a unit simplex in infinite time // *Automation and remote control*. 2005. V. 66, № 10. P. 1594–1602.
13. *Kuzenkov O., Ryabova E.* Mathematical models of selection processes // N. Novgorod: Nizhny Novgorod State University. 2010. P. 80–125.
14. *Kuzenkov O., Ryabova E.* Variational Principle for Self-replicating System // *Math. Model. Nat. Phenom*. 2015. V. 10 (2) P. 115–129.
15. *Statistics of Canada* // <https://www.statcan.gc.ca>.
16. *Kuzenkov O., Morozov A., Kuzenkova G.* Recognition of patterns of optimal diel vertical migration of zooplankton using neural networks // *IJCNN 2019 – International Joint Conference on Neural Networks*. Budapest. Hungary. 2019.
17. *Kuzenkov O.* Construction of the fitness function depending on a set of competing strategies based on the analysis of population dynamics // *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2022. V. 30, iss. 3. P. 276–298.
18. *Kuzenkov O., Morozov A.* Towards the construction of a mathematically rigorous framework for the modelling of evolutionary fitness // *Bulletin of Mathematical Biology*. 2019. V. 81, № 11. P. 4675–4700.

Особенности когнитивных функций при употреблении психоактивных веществ

Е.В. Михайлова, С.А. Полевая

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
zzztarasova@gmail.com

При хроническом употреблении психоактивных веществ возникают выраженные когнитивные нарушения, что в значительной степени определяет нарушения деятельности. Патогенез дефицита когнитивных функций у таких людей мало исследован. Характер, выраженность нарушений когнитивных функций у пациентов, которые принимают психоактивные вещества, зависят от вида препарата, дозировки, длительности зависимости и возраста пациентов, но особое внимание уделяется видам препарата.

Одним из самых часто употребляемых наркотических средств в среде молодежи являются «соли». По данным госнаркоконтроля за последние несколько лет оборот и употребление психоактивных веществ выросли в России в 2,5 раза [1]. Целью исследования стало изучение функционального состояния головного мозга и когнитивных функций у лиц, принимающих психоактивные вещества, в сравнении с людьми, не использующими психоактивные вещества, и выявление особенностей когнитивных функций при употреблении психоактивных веществ.

Материалы и методы

Традиционным способом проверки когнитивных функций выступает набор нейропсихологических тестов, проводимых экспертом, поэтому испытуемым обычно последовательно предъявляется ряд тестов. Средняя продолжительность исследования каждого испытуемого в таком случае составляет 45 мин.

Нами для проведения исследования использовалась технологическая разработка кафедры психофизиологии ФСН ННГУ им. Н.И. Лобачевского – Интернет-платформа Когнитом [2]. На базе Интернет-платформы Когнитом (platform.apway.ru) реализован удобный интерфейс, который позволяет создавать оригинальные тесты, помимо имеющихся сценариев, используемых в различных исследованиях. На платформе можно сконструировать индивидуальную тренировочную программу с учетом характеристик испытуемого. Тесты сгруппированы в три основных модуля: компьютерная кампиметрия, тесты сенсомоторной активности и варианты теста Stroop [2].

Модуль компьютерной кампиметрии обеспечивает измерение функции цветоразличения. Изначально стимул предъявляется на фоне того же цвета, далее испытуемый нажатием кнопки меняет оттенок цвета стимула до тех пор, пока не сможет определить, какие предметы (фигуры, буквы, цифры и др.) были «спрятаны», далее при успешном определении решается обратная задача.

Результатом выполнения являются дифференциальные пороговые показатели оттенков для каждого предъявляемого стимула, которые затем подвергаются первичной статистической обработке.

Тест сенсомоторной активности основан на классическом методе измерения сенсомоторной реакции. Однако анализ связи между сенсорными и моторными событиями реализован в рамках парадигмы активности, допускающей действия, связанные не только с прошедшими, но и с предсказанными будущими событиями. Возможности модуля позволяют задавать различные параметры испытания, такие как: выбирать вид стимула (картинки, текст, векторные изображения); определять целевые стимулы, место расположения стимулов на экране, время экспозиции для каждого стимула, межстимульный интервал, фон рабочей области, задержку перед началом испытания. В совокупности показатели данного теста позволяют определить степень сохранности отделов головного мозга, уровень сенсомоторной интеграции, ресурсы пространственного и селективного внимания, способность к обучению и прогнозированию [2, 3].

Тест Stroop позволяет проанализировать особенности принятия решения в ситуации когнитивного конфликта. Особенностью теста, реализованного на Интернет-платформе Когнитом, является возможность задавать названия цветов на различных языках. После первичного анализа данных выдается информация о количестве ошибок и среднем времени решения задачи в каждом контексте. Метод позволяет делать выводы об уровне когнитивного контроля, эффективности обработки вербальной и цветовой информации, а также функции внимания.

Исследование проводилось в реабилитационных центрах г. Нижнего Новгорода и г. Дзержинска. Выборка состояла из 20 мужчин в возрасте от 17 до 40 лет, из которых в фокусной группе из 10 человек находились лица, употребляющие психоактивные вещества (соли) и находящиеся в реабилитационном периоде, и 10 человек в контрольной группе – здоровые мужчины, не имеющие химической зависимости, в возрасте от 24 до 40 лет.

Результаты и обсуждение

По результатам применения модуля по тесту сенсомоторной активности моторные и когнитивные показатели в фокусной группе достоверно превышали таковые в контрольной группе (рис. 1). Таким образом, те изменения, которые происходят в нейронных сетях под влиянием психоактивных веществ, замедляют процессы обработки информации в простой сенсомоторной активности, когда

не напряжены механизмы селективного внимания и работает только базовое внимание (наличие или отсутствие объекта на экране), то есть не происходит выделение признаков.

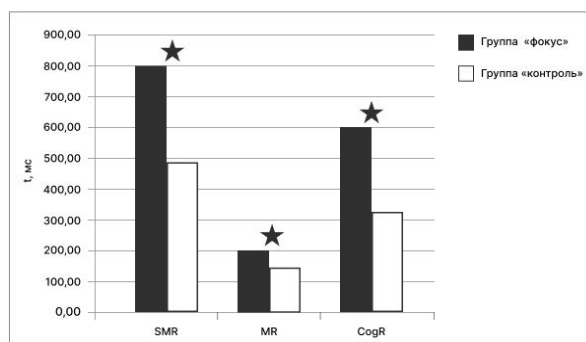


Рис. 1. Особенности скорости выполнения простой сенсомоторной реакции в фокусной группе

В модуле на сложную сенсомоторную активность в качестве целевого стимула были использованы семантические признаки «съедобное» и «несъедобное». В данном контексте присутствует обращение к индивидуальному опыту, то есть подгружаются энграммы и включается память. Эндогенный компонент принятия решения при семантическом целевом признаке играет большую роль, поскольку имеет место не просто сенсорное событие, а смысловое. Таким образом, в данном случае в работу включается большая нейронная сеть, больше модулей мозга участвуют в принятии решения. Важно отметить, что если есть нарушения в работе нейронной сети, то чем больше модулей включается в принятие решения, тем контрастнее будут различия, и это проявится в результатах исследования (рис. 2).

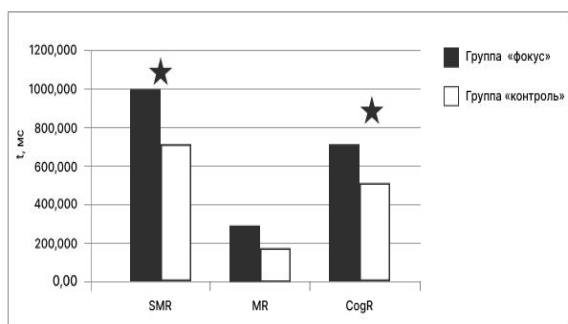


Рис. 2. Особенности скорости выполнения сложной СМА в фокусной группе

Выявленные достоверные различия во времени сенсомоторной реакции определяются достоверностью различий в когнитивном компоненте, то есть связаны с когнитивным компонентом, при этом моторный компонент у зависимых пациентов существенно не страдает.

Наблюдается дефицит как возбуждающих, так и тормозных процессов, что может подтверждать распространенную гипотезу о гипоксии. Наблюдается общий дефицит нейронной активности (рис. 3).

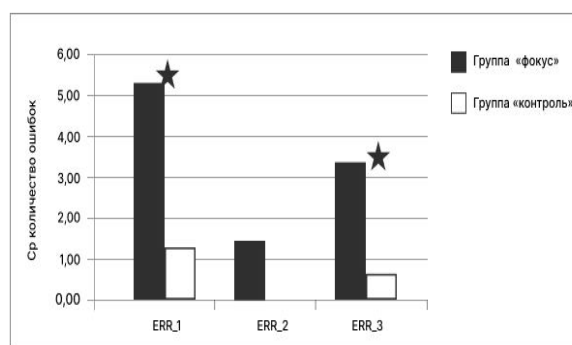


Рис. 3. Особенности точности выполнения сложной СМА в фокусной группе

Результаты, представленные на рис. 4 и 5, показывают, что по итогам статистического анализа с применением критерия Манна – Уитни были выявлены достоверные различия по количеству ошибок между фокусной и контрольной группой при решении задач типа «Color» по тесту Stroop, где участники должны были правильно выбрать цвет, а также по времени при решении задачи «trueText», где присутствует конфликт между семантикой и цветом образа (при уровне значимости $p < 0,05$ в обоих случаях). Фокусная группа показала более низкий результат, что свидетельствует о нарушении ассоциативного мышления, замедлении скорости принятия решения в сравнении с контрольной группой, а также о наличии нарушений, связанных с затрудненностью вербально-сенсорных отношений и сниженной активностью цветового сенсорного образа.

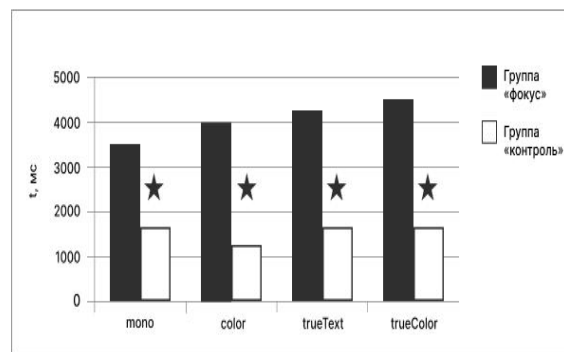


Рис. 4. Особенности времени принятия решения в тесте Stroop в фокусной группе

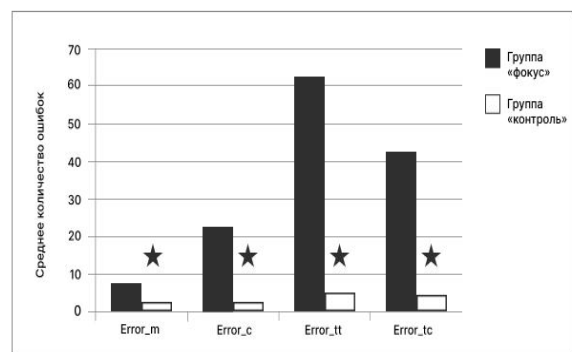


Рис. 5. Среднее количество ошибок в разных контекстах теста Stroop

Заключение

Информация об особенностях действия психоактивных веществ постоянно пополняется. Изучаются проблемы их влияния на психологическое и физическое здоровье человека. При этом многие исследователи склоняются к тому мнению, что перечень факторов, влияющих на опасные последствия действия этих веществ, продолжает расширяться, особенно когда речь идет об интегративной модели риска, включающей наследственный эндотип и дополнительный «экологический» ущерб.

Интернет-платформа Когнитом является актуальным инструментом для картирования когнитивных функций лиц, принимающих психоактивные вещества, и обеспечивает персонализированную диагностику возникающих нарушений. Рассматриваются возможности использования данной технологии в сфере когнитивной реабилитации и коррекции вышеуказанных нарушений посредством встроенных в Интернет-платформу модулей.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 22-18-20075.

Литература

1. *Богданов С.И.* Ключевые характеристики активных потребителей наркотических средств в отношении потребления основного наркотического средства / С.И. Богданов, Е.А. Чадова, Л.В. Винс и др. // Наркология. 2012. № 5. С. 46–52.
2. *Polevaya S.A., Eremin E.V., Bulanov N.A., Bakhchina A.V., Kovalchuk A.V., Parin S.B.* Event-related telemetry of heart rhythm for personalized remote monitoring of cognitive functions and stress under conditions of everyday activity // *Sovremennyye tehnologii v medicine*. 2019. V. 11, № 1. P. 109–115. <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.13>.
3. *Полевая С.А., Буланов Н.А., Парин С.Б.* Компьютерные технологии для скрининга, диагностики и цифрового отображения когнитивных нарушений // XXI международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2019»: сборник научных трудов (Москва, 07–11 октября 2019). М. : МФТИ, 2019. С. 125–132.

Моделирование и прогнозирование динамики применения различных математических методов в психологии с 1910 по 2019 годы

С.В. Морозова, И.А. Горбунов

Санкт-Петербургский государственный университет,
s.v.morozova@spbu.ru; i.a.gorbunov@spbu.ru

Применение математических методов в психологии стало острой темой для дискуссии, где существовали полярные тенденции – от активно, но некритичного применения низкокомпетентными специалистами до запрета применения и использования преимущественно качественных методов. Например, в первой половине 30-х годов в СССР наблюдалось массовое использование математических методов для диагностики и распределения по образовательным учреждениям детей в школьном образовании в системе Народных комиссариатов просвещения, которое закончилось практическим запретом применения этих методов в психологии вместе с запретом самой педологии (Постановление 1936 г.) [6]. Последнее десятилетие также проходило под эгидой «кризиса репликаций», одной из главных тенденций которого была дискуссия об ужесточении критериев оценки качества использования математических методов. Одновременно появилась критика собственно применения математических компаративных методов в психологии в основном в гендерных и кросскультурных исследованиях.

Целью нашего исследования было выявление закономерностей развития и использования различных математических методов в психологии и прогнозирование их распространения среди ученых психологов. Выявленные закономерности могут помочь в более оптимальном выборе математических методов для образования студентов в различных отраслях психологии и разработке рекомендаций к их правильному применению, а также разработке новых методов.

Для решения этой задачи с помощью поисковой системы PsycARTICLES были выбраны 32 математических метода для анализа их динамики, такие как дисперсионный анализ, факторный анализ, байесов анализ, корреляционный анализ, t -тест, χ^2 и т. п. [1]. К каждому из методов экспертами был подобран набор ключевых слов для поиска в базе данных. Мы обработали пул запросов статей по 8 ведущим журналам американской психологической ассоциации, в которых встречались ключевые слова, связанные с различными математическими методами (по всем запросам получено 204384 ссылки), в которых фигурировало 38432 статьи (подробнее [2]).

Валидность информации о характеристиках статей проверялась с помощью выборочного вычитывания (по 5 случайным образом выбранных статей за каждые 10 лет из каждого журнала, входящего в базу, всего 490 статей по разным мето-

дам). Полученные путем ручной проверки результаты сравнивались с результатами, полученными поисковой машиной EBSCO, что составляло ошибку поискового алгоритма [3]. В целом количество ошибок приемлемо и не превышает 28,8% (для метода корреляционного анализа). При этом существуют отдельные периоды времени, в которых наблюдаются систематические ошибки алгоритма поиска, они отмечаются в других работах [7].

Для коррекции работы поискового алгоритма базы PsycARTICLES мы успешно применили нейросетевые алгоритмы с подбором параметров методом бустинга [8], что улучшило качество выявления применяемых в статье математических методов. Входными данными для корректирующего алгоритма были частоты используемых слов в названии и аннотации каждой статьи, а также исходное решение поискового алгоритма базы (0 – не попала в результаты запроса по данному методу / 1 – попала) об использовании этого метода. Выходной нейрон с минимальной ошибкой предсказывал использование (1) или неиспользование (0) данного математического метода в статье, по мнению эксперта. Алгоритм разрабатывался на основе математических моделей нейронных сетей, реализованных в пакете Deep learning в приложении Matlab v.R2019. Для обучения правильному распознаванию каждого метода в статье мы использовали трехслойный перцептрон (функция patternnet) с функцией ошибки, вычисляемой как кроссэнтропия, и алгоритмом обратного распространения ошибки с коррекцией методом масштабированного сопряженного градиента (алгоритм Левенберга-Макквардта). Длительность работы алгоритма на ПК с процессором Intel Xeon E3-1220 3,0 ГГц порядка 32 часов. В результате обучения прирост точности диагностики каждого метода в среднем улучшился в 2,96 раз.

В результате были построены кривые динамики использования 13 наиболее часто встречающихся методов по полугодиям за 106 лет. По этим кривым было выявлено, что возможной моделью для объяснения данной динамики было использование скачков с затухающими гармоническими колебаниями (рис. 1).

Скачкообразные модели при описании динамики развития сложных систем применялись и ранее (напр., А. Vart, 2005). Примененная нами модель в физике обычно используется для описания колебаний маятника (подробнее [4]). Такой скачок можно описать формулой (1):

$$Y = A_0 + A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где:

A_0 – амплитуда скачка. В маятнике квадрат амплитуды пропорционален энергии колебаний ($E \sim A^2$). По аналогии в нашей модели определяет энергию воздействия метода на научное сообщество психологов;

β – степень затухания колебания $\beta = r/(2*m)$ (для маятника r – сила сопротивления среды, m – масса). В нашей модели связана с тенденцией к потере интереса к методу, не включая его утилитарную составляющую. Обратно пропорциональна инертности научного сообщества относительно принятия или отвержения данного метода (масса m – мера инертности);

ω – частота колебаний для маятника (для маятника $\omega^2 = k/m$, k – коэффициент упругости пружины от растяжения). В нашем случае ω связана со скоростью распространения информации о качестве метода и обратно пропорциональна инертности. Для вычисления периода колебаний скачка в годах в нашем случае $T = 2*\pi/\omega$ лет;

φ – фаза колебания, в нашем случае равна $-\pi$ при положительном скачке и π при отрицательном.

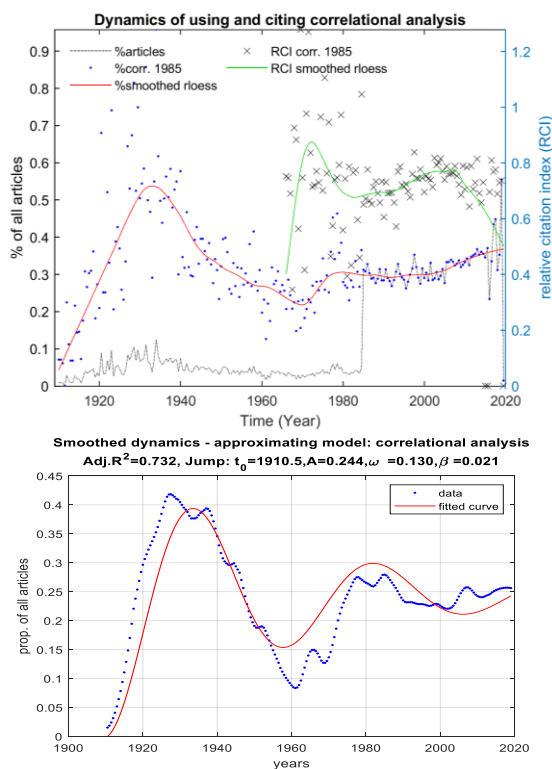


Рис. 1. Сглаженная динамика использования и цитирования статей, использующих корреляционный анализ за период с 1910 по 2019 годы (для цитирований 1965–2019) и ее модель затухающих гармонических колебаний

Однако динамику метода иногда можно описать одним скачком, а в некоторых случаях двумя или тремя скачками. Параметры моделей для разного количества скачков подбирались с помощью алгоритмов Goodness of FIT (Matlab). На рис. 2

отражены трехскачковые модели динамики использования математических методов: дисперсионный анализ и моделирование структурными уравнениями, а также прогноз их использования до 2040 года. Качество предсказания (Standard Error) для моделей растет пропорционально количеству скачков, однако существует предположение, что при увеличении сложности модели (а добавление каждого скачка добавляет количество четырех параметров) может произойти «переобучение», которое скажется на предсказательной силе модели при применении ее для прогноза дальнейшего развития. Для того чтобы выбрать наиболее адекватную модель, недостаточно оперировать только ошибкой предсказания и стандартными характеристиками (например RMSE и $Adj.R^2$), необходимо оперировать показателями вероятности моделей, что может дать байесовский анализ.

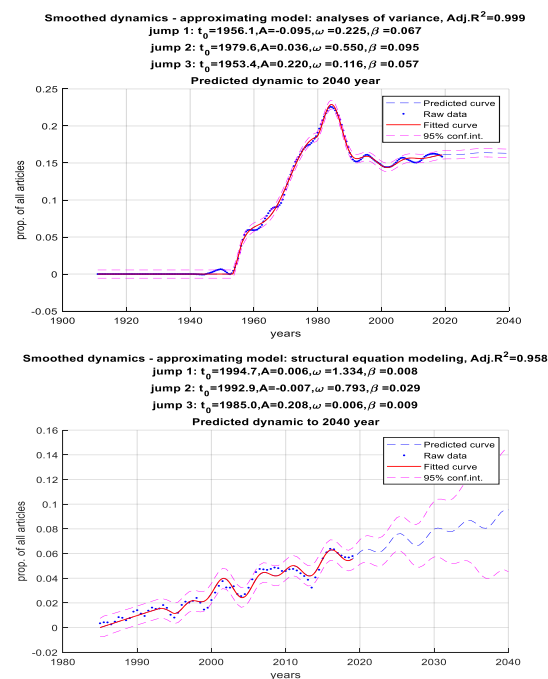


Рис. 2. Прогноз динамики использования математических методов: дисперсионный анализ и моделирование структурными уравнениями на основе моделей затухающих колебаний с 3 скачками

В результате применения байесовских алгоритмов (библиотека Rymc3, Arviz для Python) для сравнения моделей с одним, двумя и тремя скачками по параметрам WAIC (широко используемый байесовский критерий Watanabe и Akaike) были выбраны наиболее оптимальные модели. Оценка учитывала штрафы за величину модели [9]. Трехскачковые модели были более предпочтительны для всех методов, кроме математических моделей нейронных сетей, для них было предпочтительно использование двухскачковой модели.

В заключение можно сказать, что байесовское моделирование для психологических данных позволяет не только производить оценку качества модели, но и сравнивать модели по качеству, учитывая их сложность, что для психологии является

достаточно актуальным, так как психологи в силу специфики предмета исследования часто игнорируют позитивистский принцип преимущества простых моделей над сложными, что в некоторых случаях может снижать качество научных выводов.

Исследование поддержано грантом РФФИ 19-013-00279 «Имплицитные аспекты использования математических моделей в психологии».

Литература

1. Горбунов И.А. Использование программного «Робота» при анализе статистической практики (на примере базы PsycARTICLES) // В книге: Ананьевские чтения – 2019, СПб, 2019. С. 154–155.

2. Горбунов И.А. Диагностика использования математико-статистических методов в психологических исследованиях по текстовым данным резюме с помощью нелинейных алгоритмов / И.А. Горбунов, С.В. Морозова // Ананьевские чтения – 2020. Психология служебной деятельности: достижения и перспективы : материалы международной научной конференции, Санкт-Петербург, 8–11 декабря 2020 года. Санкт-Петербург : ООО «Скифия-принт». 2020. С. 527–528. EDN YIOEAG.

3. Горбунов И.А. Диагностика использования математических и статистических методов в психологии: нелинейные алгоритмы анализа аннотаций статей / И.А. Горбунов, С.В. Морозова // Когнитивная наука в

Москве: новые исследования : материалы конференции. Москва, 23–24 июня 2021 года / Под редакцией Е.В. Печенковой, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман. Москва : БукиВеди. Институт практической психологии и психоанализа, 2021. С. 496–501. EDN TJOSJB.

4. Горбунов И.А. Моделирование динамики статистической практики в психологии / И.А. Горбунов, С.В. Морозова // Ананьевские чтения – 2021 : материалы международной научной конференции, Санкт-Петербург, 19–22 октября 2021 года / Под общей редакцией А.В. Шаболтас. Отв. ред. В.И. Прусаков. Санкт-Петербург : ООО «Скифия-принт». 2021. С. 219–220. EDN AFBGLZ.

5. Bart A.G. et al. Modeling disease dynamics and survivor functions by sanogenesis curves // Journal of statistical planning and inference. 2005. V. 132, № 1, 2. P. 33–51.

6. Morozova S.V. How statistics became a “forbidden trick” for Soviet psychologists // History of Psychology. 2022. V. 25, № 2. P. 121.

7. Piotrowski C. et al. The PsycARTICLES database: Attributes and limitations // Perceptual and motor skills. 2003. V. 97, № 3. P. 993–994.

8. Schapire R.E. The boosting approach to machine learning: An overview // Nonlinear estimation and classification. 2003. P. 149–171.

9. Vehtari A., Gelman A., Gabry J. Practical Bayesian model evaluation using leave-one-out cross-validation and WAIC // Statistics and computing. 2017. V. 27, № 5. P. 1413–1432.

Нарушения когнитивных функций у лиц, зависимых от психоактивных веществ

Е.А. Мухина, В.А. Локоткова

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
helen_loky@mail.ru; Sammivimchester@gmail.com

Введение

Актуальность данной работы обоснована отсутствием единого клинического взгляда на имеющиеся последствия нейроинтоксикации и вызванные этими последствиями дефициты когнитивных функций, которые наблюдаются у лиц с зависимостью от психоактивных веществ (ПАВ).

В области реабилитации процесс антиципации (предсказание, предвидение, планирование) вызывает особый интерес специалистов-аддиктологов, так как трудности работы с зависимыми от ПАВ людьми, малое количество пациентов, выходящих в стабильную ремиссию, высокий уровень «срывов» зависимых, безусловно, связаны с дефицитами процесса антиципации.

В настоящее время в научной литературе относительно малоизученной остается зависимость от дизайнерских наркотиков класса «соль» и мефедрона, несмотря на то, что именно эти наркотики в последнее десятилетие приобрели массовое распространение.

Целью нашего исследования было выявление особенностей дефицитов когнитивных функций у лиц, зависимых от ПАВ. Анализ публикаций в этой сфере позволяет предположить наличие дисфункций мнестических процессов, процессов внимания, проспективной способности и корреляцию этих дефицитов с антиципационной несостоятельностью подобных пациентов [1–3].

Скорее всего, эти нарушения являются как следствием употребления ПАВ, так и имеют преморбидный характер. Возможно, именно нейрофизиологические дефициты, которые сказываются на работе антиципационной способности человека, и становятся одним из патогенетических факторов формирования зависимости [4].

Зависимые люди отличаются неспособностью предвидеть результаты своих действий и не в состоянии, во многих обстоятельствах, учиться на своих ошибках. Из-за этого они склонны пренебрегать возможными последствиями своих действий, переоценивают свои способности контролировать и управлять своей жизнью, а также своими влечениями и эмоциями. Именно эти нарушения и являются провокацией процесса, который впоследствии разворачивается в болезнь.

Осуществление проспективной функции как части процесса антиципации реализуется через представление модели будущего и создание шаблонов будущих ситуаций, на основе которых человек мог бы принимать решения.

Фантазируя о развитии будущих событий и проигрывая в этих фантазиях развитие тех или

иных ситуаций, перспективы и наполненность отношений с конкретными людьми, человек имеет возможность формировать виртуальный опыт, который может быть использован для регулирования его деятельности. Именно этот процесс является дефицитарным в когнитивном функционировании зависимого человека [5].

Современные исследователи приводят данные о том, что при длительном употреблении ПАВ теряется способность формировать новые воспоминания, человек помнит лишь отрывки событий или плохо связанные между собой образы, у него формируется «смещение» в сторону преобладания ранних воспоминаний [6].

Фактически, зависимые люди при работе проспективной функции из-за такого дефекта мнестического процесса формируют стратегии на основе того опыта, который был когда-то, но уже давно не актуален, а знания о новой реальности своей жизни учитывать не могут. Зависимые от ПАВ люди подвержены компульсивному и импульсивному поведению и допускают ошибки в антиципации. Становится понятным, по какой причине зависимые люди так сложно выходят в ремиссию, а также легко вовлекаются в деструктивные действия и криминальные формы взаимоотношений, руководствуясь исключительно сиюминутной выгодой, мотивированные эгоистичными целями и побуждениями [7]. Очевидно, что без корректирующих программ, которые могли бы компенсировать имеющиеся дефициты антиципационного процесса, невозможно обеспечить лечение зависимости и создать условия для нахождения зависимых людей в состоянии длительной ремиссии с предсказуемым результатом.

Методы

В исследовании изучались нарушения когнитивных функций у лиц, зависимых от ПАВ. В нем приняли участие 15 зависимых от ПАВ людей в возрасте от 17 до 27 лет, проходивших лечение от наркотической зависимости в многофункциональном медицинском центре психического здоровья «LOTUS-clinic» в 2022–2023 гг. В качестве испытуемых контрольной группы выступили волонтеры в количестве 15 человек того же возраста. Все участники исследования дали добровольное согласие на участие в проводимом исследовании. Группы испытуемых перед непосредственно когнитивным исследованием проходили процедуру скрининга для подтверждения зависимости от ПАВ в основной группе испытуемых и ее отсутствие в контрольной группе; для исключения сим-

птомов психических нарушений, которые могли бы быть соотнесены с психическими заболеваниями по МКБ-11; для исключения людей с задержкой умственного развития.

Был создан комплекс методик для изучения особенностей мнестических процессов и функции внимания, а также проспективной способности, с применением классических и современных методик изучения. «Тест Джеллиника» – методика, состоящая из трех блоков, используемая для подтверждения зависимости от ПАВ. Подсчет баллов ведется отдельно по каждому из блоков, позволяя выделить наиболее нарушенную сферу жизни испытуемого. Первый блок отражает психологические причины употребления ПАВ, второй блок – социальную картину последствий употребления, третий блок позволяет увидеть физиологические последствия употребления ПАВ. Общая сумма баллов по всем трем блокам выявляет степень выраженности зависимости. Тест «Прогрессивные матрицы Равена» использовался для исключения людей с задержкой умственного развития. Методика «Шкала памяти Векслера» («Wechsler Memory Test») применялась для исследования особенностей памяти. Методика словесно-цветовой интерференции «Тест Струпа» позволила исследовать интерферируемость и регуляторный контроль внимания, при этом использовалась современная версия теста на интернет-платформе Когнитом [8]. Методика «Таблицы Шульте» была выбрана для изучения переключения внимания в условиях активного выбора полезной информации. Тест «Tower of London» (TOL) был использован как средство выявления нарушений проспективной функции; тест Векслера (субтест-7 «Шифровка») был взят в качестве источника сведений о таких сторонах исполнительной функции, как контроль внимания и организация поведения во времени.

Результаты и обсуждение

Исследование с помощью шкалы памяти Векслера «Wechsler Memory Test» позволило выявить различия между группами по 5 субтестам (рис. 1). Третья шкала проверяет наличие психического контроля над мнестическими процессами, и задания этой шкалы направлены на работу с большим массивом информации в оперативной памяти. Четвертая шкала исследует логическую память, пятая шкала проверяет объем краткосрочной памяти и длительность удержания в ней информации, а также возможность оперировать находящимся там массивом данных. Шестая шкала оценивает зрительную память и способность к визуальному репродуцированию, седьмая шкала исследует ассоциативную память испытуемого.

По полученным данным можно сделать вывод о том, что:

- зависимые испытуемые плохо оперируют массивами информации;

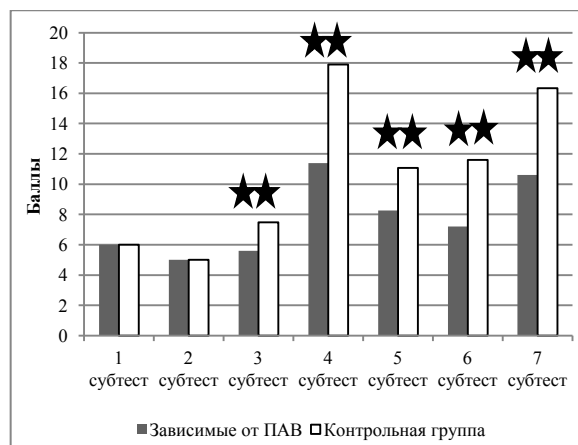


Рис. 1. Различия по шкалам теста памяти Векслера в двух группах (★ ★ – достоверные различия по *t*-критерию Стьюдента на уровне значимости $p \leq 0,01$)

- лица с зависимостью от ПАВ гораздо хуже здоровых людей понимают и запоминают логику событий и, вследствие этого, не могут полностью и достоверно вспоминать такую информацию;

- зрительная память и возможность воспроизведения увиденного у зависимых людей существенно снижена;

- ассоциативная память зависимых людей имеет выраженные дефекты.

По методике «Тест Струпа» также были выявлены достоверные различия между группами (рис. 2), при этом количество сделанных ошибок в основной группе снизилось при переходе со второго на третий модуль теста. А в контрольной группе количество ошибок росло со временем и с увеличением сложности заданий. Это говорит о том, что ошибки в контрольной группе были связаны с переключающей способностью внимания.

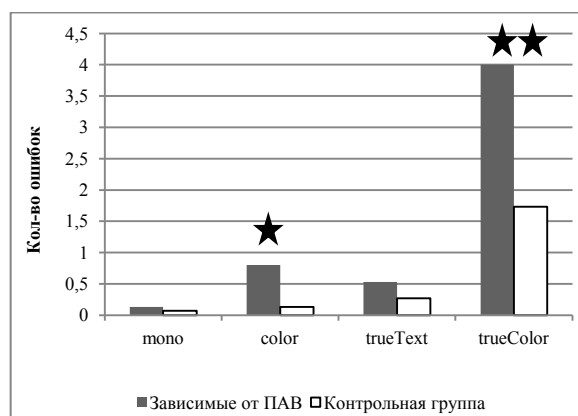


Рис. 2. Различия количества ошибок при прохождении теста Stroop в двух группах (★ ★ – достоверные различия по *t*-критерию Стьюдента на уровне значимости $p \leq 0,01$, ★ – на уровне значимости $p \leq 0,05$)

При оценке скорости выполнения заданий у зависимых лиц было обнаружено, что выполнение первого, второго и четвертого модулей достоверно выше, чем у контрольной группы. Итогом

прохождения данного теста является вывод: зависимые люди имеют выраженную ригидность контроля внимания, слабую автоматизацию познавательной функции и сниженную способность к регуляции внимания.

По методике «Таблицы Шульте» результаты показали, что группа здоровых испытуемых в среднем выполняла задания в нормативном временном интервале (31 с), а группа зависимых от ПАВ гораздо медленнее справлялась с заданиями (48,2 с) при достоверности различий на уровне значимости $p \leq 0,05$, что свидетельствует о затрудненной способности к переключению внимания у зависимых людей.

По методике теста «Tower of London» (TOL) основной показатель – количество набранных баллов, которое напрямую зависит от того, какое количество попыток потребовалось испытуемому для нахождения оптимального варианта решения поставленной перед ним задачи. Обнаружено, что возможности планирования своих действий, выработка стратегий оптимального решения задания на основе предыдущего опыта, скорость научения у испытуемых основной группы статистически значимо ниже, чем в контрольной (рис. 3).

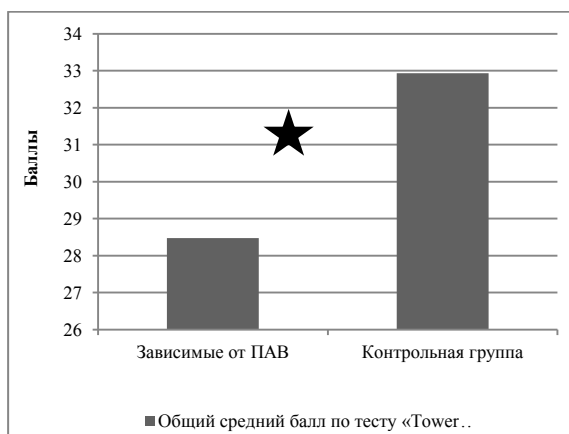


Рис. 3. Различия количества общих баллов при прохождении теста «Tower of London» в двух группах (* – достоверные различия по t -критерию Стьюдента на уровне значимости $p \leq 0,05$)

По итогам прохождения теста Векслера (субтест-7 «Шифровка») были получены достоверные различия по параметру «общее количество баллов» (рис. 4), что свидетельствует о затрудненной способности к контролю внимания у зависимых лиц. Нужно отметить, что пять человек в основной группе испытуемых при прохождении данного задания проявили нестандартный подход к его выполнению и стали заполнять ячейки таблицы не последовательно, а сначала найдя и заполнив все клеточки цифры «1», затем все клеточки цифры «2», и т. д. Такой подход не повлиял на результативность выполнения работы, однако дал возможность обнаружить нарушение концентрации внимания у данных испытуемых и плохую переключаемость функции внимания. По полученным данным можно сделать вывод: у зависимых от

ПАВ лиц хуже, чем у здоровых людей, выражена способность к контролю внимания.

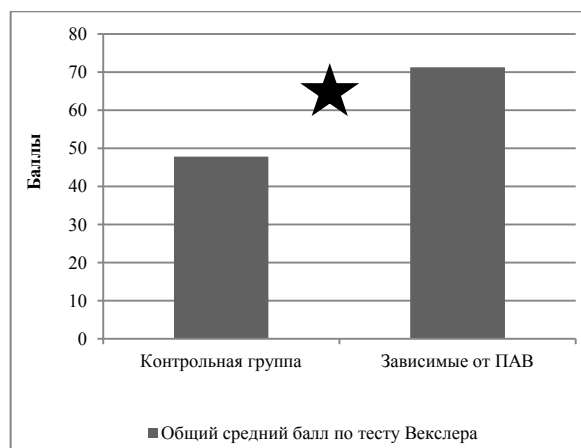


Рис. 4. Различия количества баллов при прохождении теста Векслера (субтест-7 «Шифровка») в двух группах (* – достоверные различия по t -критерию Стьюдента на уровне значимости $p \leq 0,05$)

Выводы

По результатам анализа проведенных тестовых испытаний можно сделать следующие выводы.

1. Зависимые люди гораздо хуже здоровых понимают и запоминают логику событий и, вследствие этого, не могут полностью и достоверно вспоминать такую информацию.

2. Зависимые люди имеют такие дефекты функции внимания, как выраженная ригидность контроля внимания, слабая автоматизация познавательной функции и способности к регуляции внимания, сниженная способность к переключению внимания и низкая эффективность в работе, требующей внимания. Внимание зависимых людей неустойчиво, и им сложно концентрироваться.

3. Снижены такие компоненты перспективной функции, как возможность планирования своих действий, выработка стратегий оптимального решения на основе предыдущего опыта, скорость научения.

Полученные результаты подтверждают гипотезу об «антиципационной несостоятельности» наркологических пациентов и являются основой для дальнейших исследований, а также для последующего формирования программы коррекционной работы с зависимыми от ПАВ людьми. Эти данные помогут выбрать мишени воздействия и направления коррекции, что станет следующим этапом нашей работы.

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ, грант № 22-18-20075.

Литература

1. Potvin S., Stavro K., Rizkallah E., Pelletier J. Cocaine and cognition: a systematic quantitative review // J. Addict. Med. 2014. 8:5:368–376. DOI: 10.1097/adm.000000000000066.

2. *Vonmoos M., Hulka L.M., Preller K.H., Minder F., Baumgartner M.R., Quednow B.B.* Cognitive impairment in cocaine users is drug-induced but partially reversible: evidence from a longitudinal study // *Neuropsychopharmacology*. 2014. 39:9:2200–2210. DOI: 10.1038/npp.2014.71.
3. *Пономарева Е.В., Суханова Д.Д.* Особенности памяти и внимания у наркозависимых, находящихся в стадии стабилизации // *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2017. № 12. URL: <http://e-koncept.ru/2017/172013.htm>.
4. *Raichle M.* The brain's default mode network. *Annual Review of Neuroscience*. 2015. (38): 433–447.
5. *Schacter D.L., Benoit R.G., Szpunar K.K.* Episodic future thinking: mechanisms and functions. *Current Opinion in Behavioral Sciences* 2017. (17): 41–50.
6. *Nandrino J. L., Gandolphe M. C., Alexandre C., Kmiecik E., Yguel J., Urso L.* Cognitive and affective theory of mind abilities in alcoholdependent patients: The role of autobiographical memory. *Drug Alcohol Depend.* 2014. (143): 65–73.
7. *Lehner E., D'Argembeau A.* The role of personal goals in autonoetic experience when imagining future events // *Consciousness & Cognition*. 2016. (42): 267–76.
8. *Polevaya S.A., Eremin E.V., Bulanov N.A., Bakhchina A.V., Kovalchuk A.V., Parin S.B.* Event-related telemetry of heart rhythm for personalized remote monitoring of cognitive functions and stress under conditions of everyday activity // *Sovremennye Tehnologii v Medicine*. 2019. V. 11, № 1. P. 109–115.

Особенности когнитивных функций пациентов с ОНМК

Е.А. Мухина¹, А.А. Текеева¹, М.М. Циркова², С.А. Полевая¹

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
helen_loky@mail.ru

² Клиническая больница № 2 Приволжского окружного медицинского центра ФМБА России,
Нижний Новгород, cirkova_mariya@mail.ru

Статья посвящена изучению особенностей когнитивных функций пациентов с диагнозом острое нарушение мозгового кровообращения (ОНМК) при помощи компьютерных методик на интернет-платформе Когнитом. Главной рассматриваемой проблемой представляется диагностика и коррекция когнитивных нарушений как одного из угрожающих качеству жизни последствий при ОНМК. В работе описаны актуальные методы диагностики, их достоинства и недостатки, а также представлена технологическая разработка кафедры психофизиологии ФСН ННГУ им. Н.И. Лобачевского – интернет-платформа Когнитом, которая обеспечивает цифровизацию когнитивных функций и рассматривается как современная альтернатива традиционному подходу к диагностике и когнитивной реабилитации при ОНМК. Представлены результаты исследования когнитивных функций пациентов по сравнению с контрольной группой здоровых людей.

Введение

В Российской Федерации наблюдается тревожная статистика по смертности от сосудистых заболеваний головного мозга, которые, согласно данным Росстата, занимают четвертое место, причем за последние двадцать лет заболеваемость выросла почти в 2 раза [1]. При этом среди всех случаев острого нарушения мозгового кровообращения (ОНМК) преобладают ишемические инсульты, составляя около 80% от общего числа случаев. Последствиями этого часто становятся двигательные, речевые и другие расстройства высших мозговых функций [2]. В особенности значимыми становятся выраженные когнитивные нарушения, которые являются частым осложнением ишемической болезни сердца и могут значительно ограничивать работоспособность, социальную активность и самообслуживание пациентов. Когнитивная недостаточность снижает эффективность реабилитационных мероприятий, что приводит к необходимости поиска новых методов и подходов в восстановительной медицине [3]. В разработке программ постинсультной реабилитации проблема коррекции высших мозговых функций остается нерешенной, и отсутствует единый диагностический инструментарий для оценки ее эффективности [4].

Целью нашего исследования является изучение особенностей когнитивных функций пациентов с диагнозом ОНМК при помощи компьютерных методик на интернет-платформе Когнитом.

Методы

Традиционным способом проверки когнитивных функций выступает набор нейропсихологических тестов, при этом диагностику проводит эксперт. В современных исследованиях отмечаются недостатки такого подхода: возможные субъективные искажения при проведении и оценке результатов диагностической процедуры; отсутствие формализации признаков и низкая точность. Поэтому традиционный подход не дает возможности для объективного контроля динамики при реабилитации.

В последнее время становится актуальным использование информационных технологий как альтернативы стандартным нейропсихологическим инструментам. Такой вариант может быть доступнее и помогает цифровизации процесса. Растет интерес к использованию компьютерных программ для диагностики и коррекции когнитивных функций [5, 6].

Для проведения исследования использовалась интернет-платформа Когнитом (<http://cogni-nn.ru/>). Она обеспечивает возможности для цифрового картирования когнитивных функций в широком пространстве признаков и предоставляет удобный интерфейс для конструирования оригинальных пользовательских тестов [7, 8]. Для цифровизации когнитивных функций у пациентов и волонтеров контрольной группы применялись тест Струпа и тест сложной сенсомоторной активности (шаблон !!!Счет_4000_2000_15). Тест сенсомоторной активности (рис. 1) основан на классическом методе измерения сенсомоторной реакции. Он позволяет определить степень сохранности отделов головного мозга, уровень сенсомоторной интеграции, ресурсы пространственного и селективного внимания, способность к обучению и прогнозированию. Данный шаблон применяется по отношению к числовым операциям и обеспечивает выполнение заданий по счету, математическим операциям и сравнению цифровых образов. При этом происходит измерение разных типов ошибок распознавания и времени реакции.

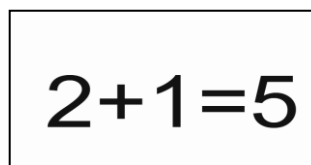


Рис. 1. Пример заданий при прохождении теста сенсомоторной активности (шаблон !!!Счет_4000_2000_15)



Рис. 2. Пример задания при прохождении теста Stroop

Модуль по тесту Stroop (рис. 2) дает возможность проанализировать особенности принятия решения в ситуации когнитивного конфликта. Отличительной особенностью теста, реализованного на интернет-платформе Когнитом, является возможность задавать названия цветов на различных языках или добавлять собственные варианты цвета для проведения экспериментов. После первичного анализа данных система выдает информацию о количестве ошибок и среднем времени решения задачи в каждом контексте. На основании этих показателей можно делать вывод об уровне когнитивного контроля, эффективности обработки вербальной и цветовой информации, а также об уровне стрессоустойчивости при ментальном стрессе.

Результаты и обсуждение

В исследовании приняло участие 16 человек в возрасте от 55 до 71 года, среди которых 7 человек с диагнозом ОНМК (тип ишемический инсульт), и 9 здоровых людей составили контрольную группу. Пациенты находились на реабилитационном лечении в Клинической больнице № 2 ПОМЦ ФМБА.

По результатам применения теста Stroop среди групп были выявлены различия, связанные со скоростью обработки цветовой и вербальной информации и принятием решения (рис. 3):

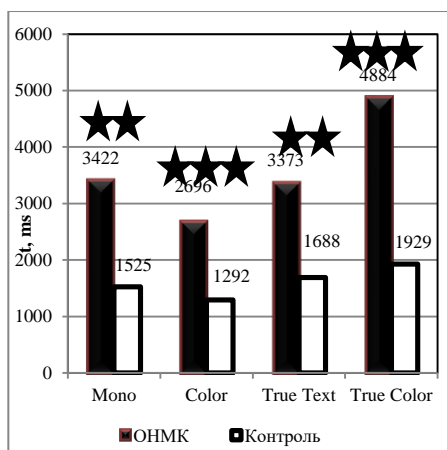


Рис. 3. Различия показателей времени при прохождении теста Stroop в контрольной и клинической группе (★★ – достоверные различия по U-критерию Манна-Уитни на уровне значимости $p \leq 0,01$; ★★★ – на уровне значимости $p \leq 0,001$)

Результаты показывают, что группа пациентов показала значимо более низкий результат по времени выполнения заданий по всем четырем модулям теста (Mono: распознавание слов, написанных черным цветом; Color: распознавание цвета букв,

соответствующего смыслу слов; True Text: распознавание смысла слов, не соответствующих цвету букв; True Color: распознавание цвета букв, не соответствующих смыслу слов). Это может указывать на наличие нарушений, связанных с затрудненностью вербально-сенсорных отношений и сниженной активностью цветового сенсорного образа.

Также у клинической группы выявлено большее количество ошибок при прохождении этого теста (рис. 4):

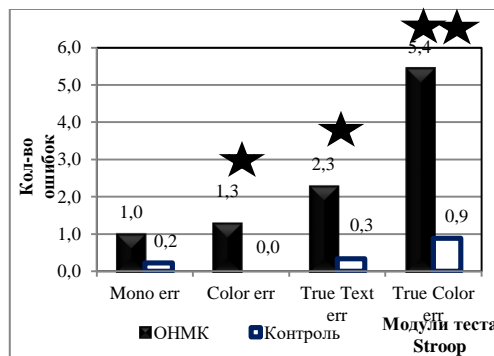


Рис. 4. Различия количества ошибок при прохождении теста Stroop в контрольной и клинической группе (★ – достоверные различия по U-критерию Манна-Уитни на уровне значимости $p \leq 0,05$; ★★ – на уровне значимости $p \leq 0,01$)

Среднее количество ошибок по трем последним модулям теста также было значительно больше у группы ОНМК. Это указывает на нарушения произвольного внимания и/или восприятия цвета у пациентов с диагнозом. Отсутствие различий по первому модулю, где главным является верное распознавание семантического образа, свидетельствует о том, что у пациентов нет нарушений интерпретации семантической информации. Увеличение числа ошибок по мере прохождения теста может указывать также на нарушение оперативной памяти, поскольку в каждом модуле различаются требования к заданию.

По результатам прохождения теста сложной сенсомоторной реакции между группами также были обнаружены различия, касающиеся количества ошибок (рис. 5).

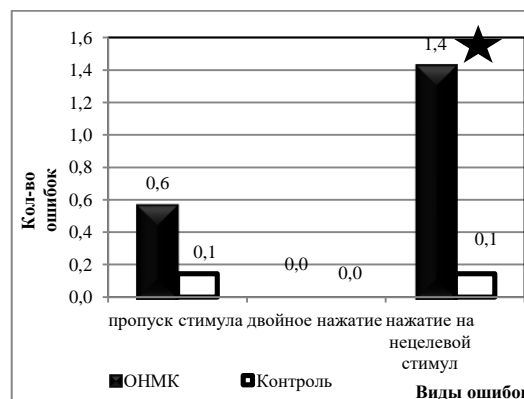


Рис. 5. Различия количества ошибок при прохождении теста СМА в контрольной и клинической группе (★ – достоверные различия по U-критерию Манна-Уитни на уровне значимости $p \leq 0,05$)

Результаты измерений в тесте СМА показывают, что пациенты чаще всего совершают ошибки третьего типа, связанные с нажатием на нецелевой стимул. Это означает, что испытуемые из клинической группы испытывают трудности даже с несложными математическими операциями и чаще получают неверный результат, что тоже может указывать на нарушения произвольного внимания и обработку цифровой информации.

Выводы

Таким образом, пациенты с диагнозом ОНМК по результатам исследования демонстрируют проблемы с произвольным вниманием, оперативной памятью и затрудненность обработки вербально-сенсорной информации. Эти результаты подчеркивают необходимость включения когнитивной реабилитации в комплексное лечение и восстановление людей после инсульта. При этом важным инструментом в реабилитации может служить интернет-платформа Когнитом, которая является актуальным инструментом для объективизации когнитивных функций, обеспечивая персонализированную диагностику и коррекцию при ОНМК.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ, грант № 22-18-20075.

Литература

1. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/>.
2. Гуреева И.Л., Голиков К.В., Гомзякова Н.А. Когнитивные и эмоциональные нарушения у пациентов с

острым нарушением мозгового кровообращения // Медицинская психология в России: электрон. науч. журн. 2017. Т. 9, № 2(43). С. 9 [Электронный ресурс]. URL: <http://mpj.ru>.

3. Парфенов В.А. Лечение и реабилитация пациентов, перенесших ишемическое нарушение мозгового кровообращения // Нервные болезни. 2006. № 1. С. 8–11.

4. Григорьева В.Н., Нестерова В.Н. Когнитивная реабилитация больных с очаговыми поражениями головного мозга // Практическая медицина. 2012. № 2 (57). С. 70–73.

5. Adolphe M., Sawayama M., Maurel D., Delmas A., Oudeyer P.-Y., Sauz on H. An Open-Source Cognitive Test Battery to Assess Human Attention and Memory // *Frontiers in Psychology*. 2022. 13:880375. / *Frontiers Media S.A.* [Lausanne], 2022. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2022.880375/full>.

6. Bogdanova Y., Yee M.K., Ho V.T., Cicerone K.D. Computerized Cognitive Rehabilitation of Attention and Executive Function in Acquired Brain Injury: A Systematic Review // *Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2016. V. 31(6). P. 419–433.

7. Полевая С.А., Буланов Н.А., Парин С.Б. Компьютерные технологии для скрининга, диагностики и цифрового отображения когнитивных нарушений // XXI международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика–2019»: сборник научных трудов. Москва. 7–11 октября 2019 г. М. : МФТИ. 2019. С. 125–132.

8. Poleyaya S.A., Eremin E.V., Bulanov N.A., Bakhchina A.V., Kovalchuk A.V., Parin S.B. Event-related telemetry of heart rhythm for personalized remote monitoring of cognitive functions and stress under conditions of everyday activity. *Sovremennye tehnologii v medicine*. 2019. V. 11, № 1. P. 109–115.

О моделировании когнитивного на примере этанол-зависимой функциональной системы

Ю.В. Никонов

ФГБУЗ МСЧ № 59 ФМБА России, г. Заречный, Пензенская область

В 2023 г. Марцином Новаковским [1] предложено использование симплициальных комплексов и теории когомологий пучков-«снопов» для формализации структуры «внутреннего наблюдателя», взаимодействующего с наблюдателем внешним. Симплициальный комплекс – семейство симплексов, «склеенных» по определённым правилам. По мнению Новаковского, представленная им концепция может иметь отношение к исследованиям роли наблюдаемости в области искусственного интеллекта и моделей сознания. В этом контексте рассматривается возможность формализации описания когов по Константину Анохину [2, 3] на примере этанол-зависимой функциональной системы [4]. Важно, что при описании макросистем психики человека ряд исследователей используют концепцию квантово-подобных (англ. quantum-like) явлений, процессов в биологии, психологии, социологии, экологии. Эти процессы описываются с помощью математического аппарата квантовой механики, но не являются квантовыми в физическом смысле. В частности, к квантово-подобным явлениям относят не коммутирующие измерения, которые «возмущают» измеряемую систему и меняют ее состояние [5]. Характерные черты квантово-подобного поведения полностью относятся к проведению теста на наличие патологического влечения к алкоголю (ПВА) [4, 5] в динамике становления ремиссии алкогольной зависимости (по МКБ-10: Психические расстройства и расстройства поведения, вызванные употреблением алкоголя – F 10.2). По мнению М.Ф. Тимофеева [6], у больного алкоголизмом формируется ЭЗФС, которая запускается в действие как экзогенными, так и эндогенными рилизинг-факторами (ЭЗФС относится к функциональным системам по П.К. Анохину). Запах алкоголя является одним из наиболее значимых раздражителей для этой системы. Наличие и интенсивность влечения к алкоголю выявляется тестом кратковременного воздействия парами этанола на обонятельный анализатор. М.Ф. Тимофеев выявлял периоды риска рецидива у больных с алкогольной зависимостью на ранних этапах становления ремиссии, используя методику изучения реакции сосудов головного мозга на запах алкоголя среди больных алкоголизмом мужчин. Контрольная и основная группы были обследованы методами реоэнцефалографии, самоотчета. На каждой реоэнцефалограмме (РЭГ) записывали фоновую кривую и рассчитывали коэффициент межполушарной асимметрии (K'ac), который вычисляется по формуле: $K'ac = (Aб - Aм/Aм) \cdot 100\%$, где Aб – амплитуда реограммы на стороне, где реографический индекс больше, а Aм – амплитуда реограммы на стороне,

где реографический индекс меньше. Затем проводили функциональную пробу с запахом алкоголя и вновь записывали РЭГ с расчетом тех же параметров (ежедневно в первые 10 дней и далее через 1–2 дня до 66-го дня ремиссии). Изменения K'ac после функциональной нагрузки фиксировались и сравнивались с показателями при фоновом исследовании в процентах. По основной группе результаты исследования были представлены в виде (K'ac) – отношения K'ac при функциональной пробе к K'ac при фоновом исследовании (в процентах) в зависимости от времени (дня воздержания от алкоголя). У больных алкогольной зависимостью из контрольной группы K'ac при фоновом исследовании равнялся $0,408 \pm 0,012$. После функциональной пробы с запахом алкоголя он уменьшался до $0,301 \pm 0,012$ (35,5%). В результате «измерения» возможна актуализация ПВА и соответствующее изменение психического и соматического состояния больного. Считается, что ПВА представлено совокупностью многоуровневых компонентов: аффективными, вегетативными, идеаторными и поведенческими. Маловероятны, но возможны и спонтанное, «эндогенное», появление ПВА во время ремиссии, и спонтанное исчезновение ПВА и становление ремиссии алкоголизма [4, 8]. Актуализации ПВА соответствует увеличение коэффициента межполушарной асимметрии, а значит, и неравенства кровоснабжения (и активации соответствующих нейронных сетей ЭЗФС) полушарий головного мозга. Результат проведения «измерения» – пробы с запахом этанола является вероятностным и носит некоммутирующий характер. Концепция М. Новаковского с его симплициальными комплексами и когомологией пучков-«снопов» напоминает гиперсетевую теорию мозга и сознания Константина Анохина, согласно которой математически нейронная гиперсеть – множество связанных между собой гиперсимплексов – когов. «Ког» – это когнитивная группа нейронов – cognitive group, COG (англ.). Узлам модели на уровне нейронных сетей могут соответствовать как единичные нейроны, так и их сети, т. е. на самом деле речь в этом контексте идет о сетях сетей и сетях сетей сетей. Ког, в то же время, – элементарная единица опыта, кодирующая соотношение целого организма с теми или иными аспектами мира. Ког – элемент когнитивного. Ког может быть описан как сноп или гиперсимплекс в гиперсети (он же симплициальный комплекс). В понятиях алгебраической топологии коги являются вершинами K-сети (когнитивной) с новым качеством, и они же представляют собой подмножества вершин нижележащей N-сети (коннектома), объединенные единым когнитивным опытом-информацией (в нашей модели ког – часть ЭЗФС).

Ребра между k -вершинами в когнитоме формируются как совокупности ребер между образующими их подмножествами n вершин в коннектоме [2, 3]. Вершина гиперсимплекса существует на более высоком уровне представления, чем сами узлы. Ког представляет собой гиперсимплекс, основание которого образовано нейронной когнитивной группой, а вершина образует узел в когнитивной гиперсети – когнитоме. Основание гиперсимплекса содержит множество элементов одного уровня, а его вершина соответствует когнитивной информации, несомой данным когом, и приобретает интегральные свойства, делающие ее элементом сети более высокого уровня. Константин Анохин опирается на математические построения Роберта Аткина и Джеффри Джонсона [8–11], согласно которым гиперсети основаны на топологических симплицальных комплексах. Он надеется, что исследования гиперсетей мозга подтолкнут математику к созданию языка описания таких структур, так же как в свое время исследования в физике направляли развитие математической физики. Когнитом, по К. Анохину, – полная система субъективного опыта, сформированная у организма в процессе эволюции, развития и познания. Структура когнитома, его динамика, согласно этим взглядам, охватывают всё многообразие ментальных явлений, связанных и с поведением, и с психикой, и с сознанием.

Математический формализм теории К. Анохина хорошо вписывается в концепцию М. Новаковского [1] как частный случай; в предлагаемой концепции внутреннего наблюдателя с использованием квантовых пучков («симплициальных комплексах»), где каждый стебель, связанный с вершиной, представляет локальную реальность внешнего наблюдателя и может быть формально представлен локальным квантовым многообразием. Вершина симплицального комплекса может быть связана с физическим (реализованным) событием и служит точкой реализации (элементом пространства точек-событий) внутреннего наблюдателя. «Реализованное» событие эквивалентно «наблюдению». По мнению автора, коллапс квантового состояния является локальным процессом, доступным внешним наблюдателям на нижних уровнях иерархии (для локальных квантовых и локальных классических систем при классической записи результатов измерений). Однако вся информация (по К. Анохину, когнитивный опыт в когнитоме) сохранится во внутреннем наблюдателе на более высоких, нелокальных уровнях иерархии. В модели реальности Новаковского события, как строительные блоки пространства-времени, существуют только у наблюдателей. В этих рамках причинно-следственная связь справедлива для внешних наблюдателей, но не является необходимой для внутренних наблюдателей. Новаковский отмечает, что когда происходит локальное взаимодействие, информация о котором также хранится внутри внутреннего наблюдателя, концепции, связанные с внутренним наблюдателем и его внутренней супералгеброй, могут потребовать дальнейшего развития известных математических структур. Для описания ин-

формации внутреннего наблюдателя предлагается, в частности, формализм запутанных историй, который расширяет представления о теории согласованных историй, допуская их сложную суперпозицию [1]. Условие согласованности для непротиворечивых запутанных историй требует, чтобы истории развивающихся систем были непротиворечивыми, даже если они разделены в пространстве и времени. Новаковский «естественным образом» хотел бы связать некоторые пространства (в данном случае алгебры наблюдаемых) с точками событий, которые можно понимать как точки взаимодействия. Естественным формальным математическим кандидатом для этого является согласованный «пучок стеблей», который представляет собой сноп. Пучок – структура, используемая для установления отношений между локальными и глобальными свойствами или характеристиками некоторого математического объекта. Классический, квантовый и гравитационный аспекты реальности являются уровнями внутренней иерархии наблюдателей и их реальностей, начиная с локального чисто классического через локальный квантовый и заканчивая более глобальными и нелокальными уровнями.

Тогда в предлагаемой модели уровень вершины когов (здесь уровень идеаторных и аффективных компонентов ПВА) соответствует уровню внешнего наблюдателя в классическом аспекте реальности. То есть ЭЗФС, свойства которой можно наблюдать как проявления ПВА, в предлагаемой модели рассматривается как часть когнитивной гиперсети, обладающая квантовоподобными свойствами. В свою очередь, уровню внутреннего наблюдателя по Новаковскому соответствует «пучок стеблей» – запутанных квантовых историй. Можно предположить, что человек, с его разумом и сознанием, не описывается одним уровнем иерархии наблюдателей и может рассматриваться, как минимум, как результат взаимодействия внутреннего и внешнего (внешних) наблюдателей.

Когнитом – когнитивная гиперсеть головного мозга – может быть отождествлен с памятью когнитивного агента. Описание свойств внутреннего наблюдателя хорошо коррелирует со свойствами биологической памяти в трактовке К. Анохина [12]: 1. Вырожденность – одно и то же событие хранится в виде множественных неидентичных копий. 2. Нерепликативность – каждое ее следующее воспроизведение отличается от предыдущего, вовлекая перекрывающуюся, но отличающуюся популяцию синапсов и нейронов – автоассоциативность. 3. Нерепрезентативность – она не является точным нервным отражением событий внешнего мира. Описанное свойство вырожденности дает высокую стабильность биологической памяти и ее способность к спонтанной и индуцированной репарации. В процессе репликации памяти мы имеем дело с переходами между «неидентичными копиями нейронных систем», которым может соответствовать динамика информации в запутан-

ных историях по Френку Вильчеку и Джордану Котлеру [13, 14].

Предположительно, концепция Новаковского о взаимозависимых внутренних и внешних наблюдателях может быть применена не только к человеку и искусственному интеллекту, но также и к другим, описанным Владимиром Лефевром субъектам. Им предложена формальная модель субъекта, совершающего выбор одной из двух полярных альтернатив – «биполярный выбор» [15]. Он оперирует вероятностями на классическом уровне реальности. Эта модель показала формальную связь между рефлексией и функционированием нейронных сетей. «Формула человека» В. Лефевра выглядит следующим образом:

$$X_1 = x_1 + (1 - x_1)(1 - x_2)x_3.$$

X_1 определяется как вероятность, с которой субъект выбирает позитивный полюс («добро»); x_1 отражает воздействие на субъект мира (может соответствовать физическим (реализованным) событиям – сфере внешнего наблюдателя; x_2 соответствует субъективному образу этого воздействия – сфере внутреннего наблюдателя, а переменная x_3 представляет интенцию субъекта. Переменные x_1 и x_2 определены на интервале $[0, 1]$ и не зависят от переменной x_3 , которая может принимать любое значение из интервала $[0, 1]$. Если $X_1 = x_3$ (при $x_1 + x_2 > 0$), то: $X_1 = x_1 / (x_1 + x_2 - x_1x_2)$ – реалистический выбор в терминологии Лефевра. Значение готовности субъекта генерируется блоком нейронов, в котором возникают кратковременные равновероятные связи между произвольными парами нейронов. Интересно, что закономерности становления ремиссии алкогольной зависимости, о которых упоминалось в данной статье, вполне согласуются с моделью Лефевра [16]. Лефевр предполагал, что его формальная модель субъекта описывает любого субъекта, который может существовать в Космосе, например, потоки плазмы, структурированные магнитным полем.

В статье предложено использовать для формализации структуры кога (кога как нейронной сети и кога как элемента феноменального опыта – информационного объекта) концепцию Марцина Новаковского о внутренних и внешних наблюдателях. Коги мозга-психики человека – частный случай соответствующих структур наблюдателей, в том числе наблюдателя – искусственного интеллекта и наблюдателя – космического субъекта по Владимиру Лефевру.

Литература

1. *Nowakowski M.* Towards Physics of Internal Observers: Exploring the Roles of External and Internal Observers. [Электронный ресурс]. 2023. URL: (arXiv:2304.01677).
2. *Анохин К.В.* Когнитом: в поисках единой теории для когнитивной науки // Шестая международная конференция по когнитивной науке : тезисы конференции. Калининград, 2014. С. 26–27.
3. *Анохин К.В.* Мыслящая гиперсеть // В мире науки. 2021, № 5–6.
4. *Никонов Ю.В.* О моделировании многослойных сетей коннектома – когнитом на примере этанол-зависимой функциональной системы // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды IV Всероссийской конференции. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 155–158.
5. *Khrennikov A.* Open systems, quantum probability and logic for quantum-like modeling in biology, cognition, and decision making. [Электронный ресурс]. 2023. URL:(arXiv:2304.08599).
6. *Тимофеев М.Ф.* Периоды риска у больных алкоголизмом на ранних этапах ремиссии и противоречивая иглотерапия // Вопросы наркологии. 1992. № 1. С. 35–38.
7. *Антропов Ю.А.* и др. Некоторые аспекты патологического (зависимого) влечения при алкоголизме // Вопросы наркологии. 2014. № 1. С. 121–132.
8. *Atkin R.H.* From cohomology in physics to q-connectivity in social science // Int. J. Man-Mach. Stud. 1972; 4(2):139–67.
9. *Johnson J.H.* Hierarchical set definition by q-analysis, part I. The hierarchical backcloth // Int. J. Man-Mach. Stud. 1983; 18 (4): 337–59.
10. *Johnson J.H.* Hierarchical set definition by q-analysis, part II. Traffic on the hierarchical backcloth // Int. J. Man-Mach. Stud. 1983; 18(5): 467–87.
11. *Johnson J.* Hypernetworks in the science of complex systems // 1st edn. Series on complexity science. V. 3. Imperial College Press. London. 2013.
12. *Анохин К.В.* На пути к нейроморфному интеллекту: эксперименты, модели и технологии. [Электронный ресурс] // БиоН. Нейротехнологии. Нижний Новгород, 2011. URL: <http://www.school2.neurobiotech.ru/sites/default/files/AnokhinNN.pdf>.
13. *Cotler J., Wilczek F.* Entangled histories // Phys. Scr. 2016. 168, 014004.
14. *Nowakowski M., Cohen E. and Horodecki P.* Entangled histories versus the two-state-vector formalism: Towards a better understanding of quantum temporal correlations // Phys. Rev. A. 2018. 98. P. 032312.
15. *Лефевр В.А.* Космический субъект. М. : Ин-квартио. 222 с.
16. *Никонов Ю.В.* Алкогольная зависимость в контексте «формулы человека» Лефевра // Рефлексивные процессы и управление. 2008. Т. 8, № 2. С. 105–110.

Деперсонализация анализа variability ритма сердца при оценке аллостатической нагрузки

М.В. Никулина

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, nikamarathon@gmail.com

Введение

Уже более 60-ти лет исследование variability ритма сердца (ВРС) позиционируют как перспективное направление функциональной диагностики. Тем не менее оно не получило широко, сравнимого с классической электрокардиографией, распространения. Очевидно, что этому способствуют сложность интерпретации, отсутствие стандартизации, необходимость индивидуального подхода и учета контекста деятельности [1, 2]. В этой работе предлагается простая идея стандартизации анализа ВРС при оценке аллостатической нагрузки, то есть стоимости конкретной деятельности для организма. Она базируется на следующих положениях.

1. После физической нагрузки с любыми характеристиками возникает антиноцицептивный эффект [3].

2. Данный эффект можно объяснить активацией эндогенной опиоидной системы (ЭОС), поскольку опиоиды обладают анальгетическим свойством. Трехкомпонентная теория стресса позиционирует ЭОС как стресс-лимитирующую систему, ограничивающую активацию симпатoadреналовой и гипоталамо-гипофизарно-адреналовой систем. ЭОС с разной степенью доминирования присутствует на всех трех стадиях стресс-реакции [4].

3. Изучение динамики порогов термонцицептивных реакций как маркера состояния ЭОС возможно по оценке временных интервалов [5].

4. Последнее десятилетие в клинику внедряется индекс анальгезии/ноцицепции, в котором степень анальгезии на фоне седации оценивается по респираторному влиянию на ВРС [6–11]. Индекс не зависит от частоты сердечных сокращений и частоты дыхания.

В данной работе демонстрируется возможность мониторинга аллостатической нагрузки в контексте естественной деятельности через определение активности ЭОС. Проведено сравнение оценок активности ЭОС по латентному времени тепловой реакции и временному анализу ВРС, выявляющему респираторное влияние на ВРС.

Методы

Было разработано и опробовано с участием спортсменов разной квалификации, возраста и пола [12] устройство для измерения порога термонцицептивной чувствительности (ТНЧ) посредством фиксации латентного времени тепловой реакции (ЛВТР). Участнику эксперимента предлагалось держать запястье левой руки у основания большого пальца на термопластине при температуре на индикаторе 47 °С. Фиксировалось время

удержания до появления неприятных ощущений. Кардиоинтервалограммы (КИГ) – изменение интервала между зубцами R электрокардиограммы во времени – записывались посредством фитнес-датчика сердечного ритма (нагрудного пояса Kalenji Dual HRM) с точностью измерения кардиоинтервалов 1 мс (рис. 1).

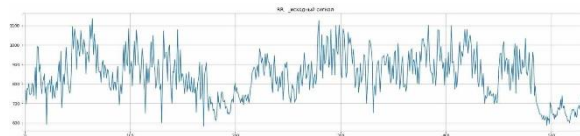


Рис. 1. Исходная кардиоинтервалограмма. Ордината – величина RR интервала в мс, абсцисса – номер интервала

Традиционно при спектральном анализе КИГ выделяются диапазоны частот: очень низкий – VLF (0,003–0,040 Гц), низкий – LF (0,04–0,15 Гц) и высокий – HF (0,15–0,4 Гц) [1, 2]. LF соответствует симпатическим, HF – парасимпатическим влияниям. Дыхательный паттерн ВРС присутствует в частотном в диапазоне 0,15–0,5 Гц.

Для измерения респираторного влияния на ВРС к исходной последовательности RR интервалов был применен следующий алгоритм нормализации, соответствующий логике [7]:

1. Осуществляется передискретизация исходной, по определению неравномерно дискретизированной, временной последовательности RR интервалов. Проводится кубическая интерполяция КИГ на частоте дискретизации 8 Гц. Получается новая, равномерно дискретизированная последовательность $\{RR_N\}$.

2. В результате гауссова сглаживания из $\{RR_N\}$ получается $\{RR_M\}$. Для сглаживания вычисляется свертка с окном Гаусса G:

$$G(n) = \exp\left(-\frac{2(n - m/2)^2}{(am)^2}\right),$$

имеющим размер $m = 256$ отсчетов и стандартное отклонение $a = 2$.

$$\{RR_M\} = \{RR_N\} * G / \sum G.$$

Гауссово сглаживание как фильтр низкой частоты лучше скользящего среднего вследствие меньшей утечки спектра.

3. Вычитанием $\{RR_F\} = \{RR_N\} - \{RR_M\}$ производится декомпозиция $\{RR_N\}$ на быструю и медленную составляющие. Выделяется быстрая компонента $\{RR_F\}$ [13].

4. Вычисляется скользящая норма $\{S\}$ по окну m .

$$S_i = \sqrt{\sum_{i=1}^m (RR_{Fi})^2}.$$

5. Каждый элемент $\{RR_F\}$ делится на соответствующую норму из $\{S\}$.

$$RR_{Fi} = RR_{Fi} / S_i.$$

6. Поскольку метод основан на измерении амплитуд дыхательного паттерна ВРС, нас интересуют частоты в диапазоне 0,15–0,5 Гц. Для выделения интересующего диапазона из быстрой компоненты к $\{RR_F\}$ применяется цифровая вейвлет-фильтрация с базисным вейвлетом Добеши 4 [7]. При обратном восстановлении последовательности после вейвлет-разложения оставляются только 4 и 5 коэффициенты разложения, что соответствует диапазону 0,16–0,67 Гц. Так получается $\{RR_{FF}\}$.

7. Находятся и соединяются между собой локальные минимумы и максимумы нормализованной последовательности $\{RR_{FF}\}$ (рис. 2). Сердечно-дыхательное взаимодействие оценивается по изменению площади между кривыми локальных минимумов и максимумов. Площадь измеряется в нормализованных единицах.

8. В окне длительностью 512 отсчетов (64 с) горизонтальная ось равномерно делится на 4 части. Определяется минимальная площадь из 4-х сегментов, S_{\min} . Вводится индекс анальгезии $I_a = S_{\min} \cdot 100$.

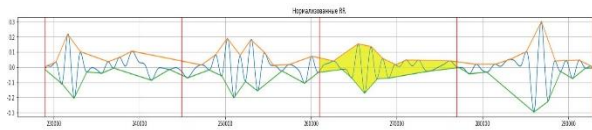


Рис. 2. Окно из 512 отсчетов нормализованной $\{RR_{FF}\}$. Залита четверть с минимальной площадью между положительной и отрицательной кривыми экстремумов серии

Мгновенное значение S_{\min} вычисляется каждые 4 с. Среднее значение каждые 16 с.

Запись КИГ и параллельное измерение латентного времени тепловой реакции у 4 спортсменов проводились в течение трехдневного тренировочного микроцикла из 4 занятий, до и после каждого тренировочного занятия. Последовательно выполнялись беговые нагрузки разной мощности и продолжительности: 9 км, (5×580 м), (2×1000 м), 15 км (девушки)/20 км (юноши).

У 11 спортсменов измерено ЛВТР до и после длительной аэробной (> 4 часов) беговой нагрузки.

Результаты и обсуждение

В предположении, что длительная аэробная нагрузка активизирует ЭОС [14], был проведен групповой статистический анализ изменения

ЛВТР при длительной нагрузке. Были получены две достоверно различающиеся выборки – до и после нагрузки (непараметрический критерий Вилкоксона для зависимых выборок, $p < 0,05$, количество участников 11). Диаграммы распределения в группах представлены на рис. 3. Поскольку группы неоднородны по большому числу признаков (подготовленность, состояние ЭОС, пол и пр.) межгрупповая корреляция отсутствует ($r = 0,15$). Статистический анализ ЛВТР показал, что термоноцицептивная чувствительность значительно ухудшается (в $5,4 \pm 4,2$ раза) в процессе длительной аэробной нагрузки. Уменьшение ТНЧ можно объяснить ЭОС-аналгезией и предположить, что этот феномен может быть использован для индивидуальной оценки степени аллостатической нагруженности.

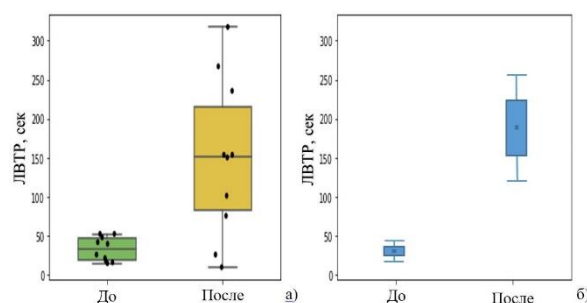


Рис. 3. Распределение латентного времени тепловой реакции в группах до и после длительной (> 4 часов) аэробной нагрузки: а) стандартное отклонение, б) стандартная ошибка

Был проведен персонифицированный анализ записей КИГ для участника Гл (девочка 15 лет), выполнявшего задания описанного микроцикла. Изменение ЛВТР и усредненного за время его регистрации индекса I_a приведены на рис. 4. Обнаружена высокая корреляция ($r = 0,86$) между оцененным по ЛВТР уровнем термоноцицептивной чувствительности и рассчитанным по ВРС индексом анальгезии I_a .

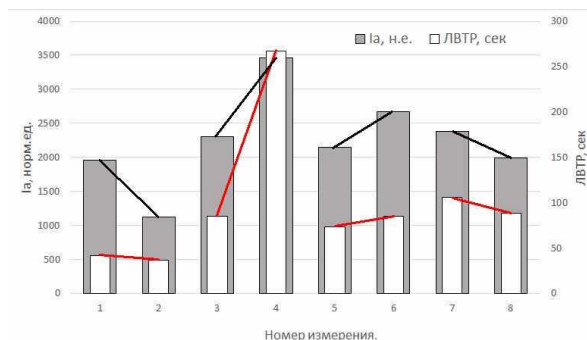


Рис. 4. Изменение ЛВТР (белые столбцы) и индекса анальгезии (серые столбцы) в тренировочном микроцикле у спортсменки Гл. Красные и черные линии соединяют состояния до и после тренировки. Нечетные номера – до, четные – после тренировки

Внутригрупповые изменения ЛВТР при выполнении различных нагрузок представлены на рис. 5. Начало и конец отрезков соответствуют началу и окончанию одного занятия.

Нужно особо отметить ситуацию, возникшую со спортсменкой Гл. Основываясь на внешних признаках усталости спортсменки, тренер сократил задание с 5 до 3 повторений (точка 4 на рис. 4, окончание второй тренировки на рис. 5), что по физиологическому эффекту соответствовало 5-кратному повторению участницы Че и было подтверждено замерами ЛВТР.

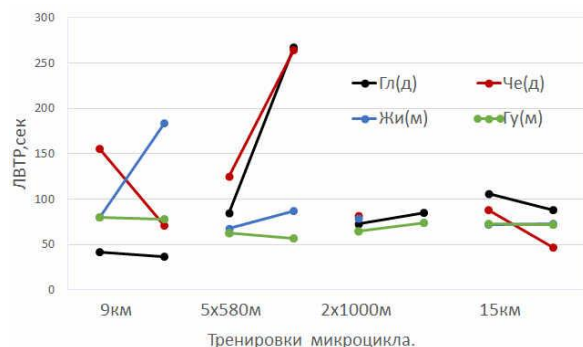


Рис. 5. Изменение ЛВТР при выполнении различных нагрузок для 4 участников. Один отрезок соответствует одному занятию

Видно, что юноши Жи и Гу перенесли данную нагрузку легче. В то же время, как показывает рис. 5, 9 км на первой тренировке дали участнику Жи тяжелее, что подтверждает необходимость индивидуализации тренировочных планов.

Очевидно, что в анализ связи антиноцицепции и ВРС необходимо ввести фактор стресса, оценка которого возможна по вариабельности ритма сердца [15].

Выводы

1. Проведенное исследование демонстрирует возможность деперсонификации анализа вариабельности сердечного ритма.

2. Изменение термонцицептивной чувствительности может быть использовано для контроля аллостатической нагрузки.

3. Обнаружена высокая корреляция нормализованной мощности высокой частоты ВРС в диапазоне 0,16–0,67 Гц и уровня термонцицептивной чувствительности. Это позволяет заменить неудобную процедуру измерения ЛВТР расчетом индекса анальгезии в реальном времени. Использование ВРС исключит субъективные искажения ЛВТР.

4. Необходимы исследования связи антиноцицепции и амплитуды дыхательного паттерна ВРС на статистически значимой выборке при отсутствии седации.

5. Требуется изучение влияния фактора стресса на индекс анальгезии.

Работа выполнена при частичной поддержке государственной программы 0030-2021-0013.

Литература

1. Шлык Н.И. Управление тренировочным процессом спортсменов с учетом индивидуальных характери-

стик вариабельности ритма сердца // Физиология человека. 2016. Т. 42, № 6. С. 1–10.

2. Михайлов В.М. Вариабельность ритма сердца: опыт практического применения метода. Иваново: Иван. гос. мед. академия. 2002. 290 с.

3. Droste C. Transient hypoalgesia under physical exercise—relation to silent ischaemia and implications for cardiac rehabilitation // Ann. Acad. Med. Singap. 21 (1992): 23–33.

4. Парин С.Б. Люди и животные в экстремальных ситуациях: нейрохимические механизмы, эволюционный аспект // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия «Психология», 2, № 2 (2008): 118–135.

5. Литвинова С.В., Надеждин А.В. Способ оценки состояния эндогенной опиоидной системы у человека. РФ Патент RU2199942. 27.04.2001 г.

6. Logier R., Jeanne M., De Jonckheere J., Tavernier B. // Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. New York City, USA, 2006. 4303–4306.

7. Jeanne M., Logier R., De Jonckheere J., Tavernier B. Validation of a graphic measurement of heart rate variability to assess analgesia/nociception balance during general anesthesia // 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Minneapolis, Minnesota, USA, September 2–6, 2009. 1840–1843.

8. Ledowski T., Tiong S.W., Lee C., Wong B., Fiori T., Parker N. Analgesia nociception index: evaluation as a new parameter for acute postoperative pain // BJA 111(4) (2013): 627–629.

9. Shahiri T.S., Richebé P., Richard-Lalonde M. Description of the validity of the Analgesia Nociception Index (ANI) and Nociception Level Index (NOL) for nociception assessment in anesthetised patients undergoing surgery: A systematised review // J. Clin. Monit., 2021.

10. Спасова А.П., Тихова Г.П., Базаров Р.О. Индекс анальгезии-ноцицепции: возможности и пределы // Вестник анестезиологии и реаниматологии. 2015. С. 64–70.

11. Тарасова Н.Ю., Шмигельский А.В., Лубнин А.Ю., Куликов А.С. Количественный интраоперационный мониторинг анальгезии // Анестезиология и реаниматология, 3. 2020. С. 27–36.

12. Никулина М.В., Творогова О.В. Мониторинг анальгезии в тренировочном контроле // Современные подходы к оптимизации физического воспитания, спортивной тренировки и оздоровления населения: XXI международная научно-практическая конференция. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2022.

13. Никулина М.В., Антоцев В.А. Опыт оценки вариабельности сердечного ритма по сглаженным кардиоинтервалограммам // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 2. С. 176–188.

14. Никулина М.В. Периодограмма Ломба-Скаргла при активизации эндогенной опиоидной системы // Безопасный спорт–2022: IX международная научно-практическая конференция. Изд-во СЗГМУ им. И.И. Мечникова. 2022.

15. Polevaya S.A., Eremin E.V., Bulanov N.A. et al. Event-Related Telemetry of Heart Rate for Personalized Remote Monitoring of Cognitive Functions and Stress under Conditions of Everyday Activity // Modern Technologies in Medicine. 2019. V. 11, № 1. P. 109–115.

Феноменологическая модель нейропластичности

И.В. Нуйдель¹, А.В. Колосов¹, С.А. Полевая², В.Г. Яхно¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, nuidel@ipfran.ru

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В настоящее время накоплено достаточно много экспериментальных данных, подтверждающих, что состоянием человека можно управлять с помощью внешних сигналов, модулированных собственными интрорецептивными сигналами физиологической или нейрофизиологической активности. Это свойство человеческого мозга изменяться, например, под действием опыта или в ответ на внешнее воздействие получило название нейропластичности [1, 2]. Для технологии воздействия сигналов обратной связи на мозг человека используется термин «нейроинтерфейс». Принцип замкнутой петли обратной связи от эндогенных ритмов человека успешно используется в современных технологиях нейробиоуправления и в методах адаптивной нейростимуляции [3].

Экспериментально подтверждено, что комплексная обратная связь от электроэнцефалограммы (ЭЭГ) пациента может привести к увеличению эффективности подавления стресс-индуцированных состояний. Установлено, что предъявление испытуемым, находящимся в состоянии тревоги и стресса, световых ритмических воздействий, автоматически формируемых в реальном времени на основе их ЭЭГ, приводит к достоверному увеличению мощности ЭЭГ, а также снижению уровня эмоциональной дезадаптации и стрессированности испытуемых [4, 5]. Вызванные стрессом функциональные нарушения корректируются.

Перспективы развития технологий нейробиоуправления и нейростимуляции определяются их высокой персонализацией через использование обратной связи от собственных ритмических процессов пациента.

На модели таламокортикальной ячейки проведены расчеты, которые качественно воспроизводят эффекты спектральной динамики у человека в ответ на подобный экспериментальному внешний сигнал. Такие расчеты смогут стать источником новых протоколов нейробиоуправления.

Модель в этом смысле можно считать симулятором персональных таламокортикальных реакций. Перспективная цель этой работы – использовать параметры модели и расчеты при подборе оптимальных режимов стимуляции (например, фотостимуляции [4–6]) для формирования полезных ЭЭГ-паттернов, чтобы влиять на характеристики персональной таламокортикальной системы испытуемого (пациента) и улучшать его эмоциональное состояние.

Динамика ЭЭГ-сигнала. Эксперимент

Протокол эксперимента по резонансному биоуправлению подробно изложен в [4, 5].

В ходе эксперимента мерцающая с линейно увеличивающейся частотой инфракрасная лампа направляется на закрытые глаза испытуемого. ЭЭГ испытуемого снимается до воздействия на него импульсным инфракрасным излучением, в процессе воздействия и после воздействия. На основе регистрируемых частот альфа-ритма испытуемого (в состоянии покоя при закрытых глазах), формируется внешний сигнал с теми же частотными характеристиками (частоты альфа-пика и альфа-диапазона). Динамический спектр внешнего сигнала приведен на рис. 1, а, 2, а. Динамические спектры ЭЭГ в ходе экспериментов по резонансному биоуправлению приведены на рис. 1, б, 2, б, в.

В экспериментах у разных испытуемых проявляются следующие эффекты: сформирован или не сформирован альфа-пик в спектре ЭЭГ; наблюдаются (не наблюдаются) резонансные спектральные пики на частоте стимуляции; наблюдаются (не наблюдаются) резонансные спектральные пики на кратных стимуляции частотах (мультипликация ритма); устойчивость (неустойчивость) альфа-диапазона в ходе эксперимента (рис. 1, 2).

Например, в спектральной динамике испытуемого (рис. 1, б) альфа-диапазон ЭЭГ сформирован, альфа-пик устойчиво регистрируется на частоте около 9,5 Гц (время от 0 до 200 с); при подаче внешнего сигнала (время 200–450 с) регистрируется усвоение ритма и устойчивость альфа-диапазона. На рис. 1, б видно, что уже при первых световых воздействиях и по мере увеличения их частоты в спектрах ЭЭГ наблюдается резонансные спектральные пики, точно совпадающие по частоте с действующей в данный момент частотой стимуляции. Эти спектральные пики образуют в правой части рис. 1, б наклонную прямую линию, отражающую резонансную активацию ЭЭГ на частоте стимуляции.

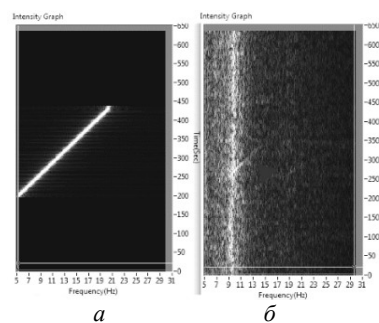


Рис. 1. Динамические спектры для внешнего инфракрасного сигнала с линейно возрастающей частотой (слева) и для соответствующей таламокортикальной ЭЭГ одного из испытуемых (справа). По оси абсцисс – частота спектра, Гц; по оси ординат – время эксперимента, с. По оси Z – спектральная плотность, отраженная в яркости

В экспериментах по исследованию динамики спектров у младших школьников с проблемами школьной дезадаптации, гиперактивных детей, испытывающих трудности с концентрацией внимания и усвоением материала, выявлены следующие примеры спектральной динамики (рис. 2) [5].

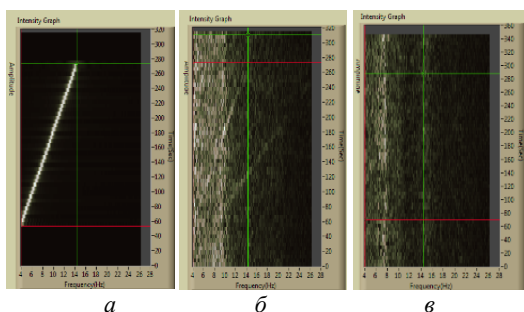


Рис. 2. Динамика спектров ЭЭГ (б, в) и стимуляции (а) в ходе обследования испытуемых [5]

В норме у испытуемого (спектр на рис. 2, б) альфа-диапазон ЭЭГ сформирован, а альфа-пик устойчиво регистрируется (в примере на частоте около 9,5 Гц). В ответ на внешний сигнал в спектрах ЭЭГ наблюдаются резонансные спектральные пики, точно совпадающие по частоте с действующей в данный момент частотой стимуляции, и на частоте второй гармоники стимуляции (рис. 2, в). Эти спектральные пики образуют наклонные прямые линии на рис. 2, в. В спектральной динамике данного испытуемого регистрируется усвоение ритма, мультипликация и устойчивость альфа-диапазона.

У части обследуемых с проблемами концентрации внимания резонансные ЭЭГ-реакции в ответ на фотостимуляцию не отмечались, а доминирующим являлся не альфа-, а тета-диапазон ЭЭГ от 4 до 8 Гц. Типичный пример динамики спектров ЭЭГ с отсутствием резонансных ЭЭГ-реакций и несформированным альфа-диапазоном представлен на рис. 2, в.

Модель

Для моделирования ЭЭГ-осцилляторной системы человека предлагается феноменологическая модель нейропластичности на основе взаимодействия ансамблей внутри одного таламокортикального модуля или нескольких взаимодействующих модулей.

При выборе этого подхода мы опираемся на данные экспериментальных нейрофизиологических исследований о том, что взаимосвязанные нейрональные модули: специфический таламус, кора, ретикулярные ядра таламуса – играют важную роль в процессах обработки информации. Активность мозга регистрируется в сигналах ЭЭГ.

Один нейронный модуль состоит из ансамблей пирамидных нейронов и тормозных интернейронов коры (Кора), нейронов специфических таламических ядер (Таламус) и тормозных нейронов ретикулярного ядра таламуса (Ретикулярные ядра таламуса), связанных между собой.

Схема межмодульного взаимодействия показана на рис. 3, а. Треугольниками на схеме пока-

заны возбудительные, а кружками – тормозные связи между модулями. Внешний сенсорный сигнал в систему попадает через таламус. Стрелка в нижней части рисунка – сенсорный вход в таламус.

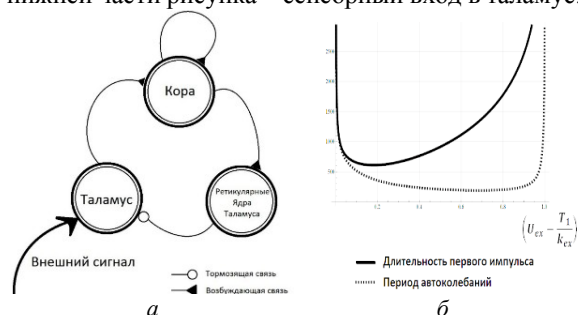


Рис. 3. Схема функциональных связей между подсистемами в одной таламокортикальной ячейке (а) и зависимость длительности первого импульса (сплошная линия) и периода следующих за ним автоколебаний от постоянной величины внешнего сигнала (пунктир) (б)

Модель элементарной таламокортикальной ячейки, соответствующая схеме на рис. 3, а, описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dU_1}{dt} = -\frac{U_1}{\tau_1} + k_1 \cdot F_1[-T_1 + k_{ex}U_{ex} + k_{13}U_3], \quad (1)$$

$$\frac{dU_2}{dt} = -\frac{U_2}{\tau_2} + k_2 \cdot F_2[-T_2 + k_{21}U_1 + k_{22}U_2], \quad (2)$$

$$\frac{dU_3}{dt} = -\frac{U_3}{\tau_3} + k_3 \cdot F_3[-T_3 + k_{32}U_2], \quad (3)$$

где U_1, U_2, U_3 – усредненная активность нейронов выбранных участков таламуса, коры и ретикулярных ядер таламуса, соответственно; τ_i – характерное время затухания активности в соответствующих нейронных ансамблях; k_i – амплитуда генерации импульсной активности соответствующими нейронными ансамблями; T_i – усредненные величины для порогов возбуждения соответствующих нейронных ансамблей; U_{ex} – входной сигнал, поступающий на таламус; k_{ij} – коэффициенты взаимной связи между подсистемами в таламокортикальной ячейке; $F_i[\]$ – ступенчато-образные функции, крутизна которых характеризует разброс величин порогов около усредненных значений в рассматриваемом ансамбле (другое название – функции энергообеспечения), в квадратных скобках – аналог постсинаптического потенциала на мембранах соответствующих ансамблей нейронов.

Эту модель будем использовать для интерпретации экспериментов по биоуправлению, т. е. управлению параметрами ЭЭГ-осцилляторной системы человека внешним сигналом с параметрами ЭЭГ данного человека. В этом смысле модель таламокортикальной ячейки является моделью нейропластичности [1–3], так как динамические режимы модели объясняются соотношением амплитуды внешнего сигнала, порога срабатывания и силы влияния входного сигнала на активность таламического ядра, через который идет внешний сигнал на кору.

Для выбора параметров модели была исследована важная зависимость от внешнего сигнала

длительности первого импульса и период следующих за ним автоколебаний, ее вид приведен на рис. 3, б [6]. Важным параметром является также наклон ступенчатообразных функций $F_i[\cdot]$ и пороги срабатывания для модельных переменных.

Моделирование экспериментальной спектральной динамики сигналов. Некоторые результаты

Рассмотрим динамические режимы в математической модели элементарной таламокортикальной ячейки с постоянным внешним сигналом. Уравнения, приведенные ниже, представляют собой редуцированную модель с одинаковыми временами релаксации и определенными значениями коэффициентов взаимной связи подсистем:

$$\frac{dU_1}{dt} = -U_1 + F[U_{\text{ex}}(t) - U_3], \quad (4)$$

$$\frac{dU_2}{dt} = -U_2 + F[-0,5 + U_1], \quad (5)$$

$$\frac{dU_3}{dt} = -U_3 + F[-0,5 + U_2]. \quad (6)$$

$U_{\text{ex}}(t)$ – внешний сигнал задан (7) на ограниченном временном интервале (рис. 4).

$$U_{\text{ex}} = A(t)|\sin(\omega_{\text{ex}} t^2)| \quad (7)$$

Структура трехмерного фазового пространства (U_1, U_2, U_3) показывает, как при выбранных начальных условиях $0 < U_{\text{ex}} < 1$ перемещается точка из заданного начального состояния. При $U_{\text{ex}} = 1$ или $U_{\text{ex}} = 0$ цикл сливается с состоянием равновесия с образованием устойчивого состояния равновесия. В неавтономной системе состояние равновесия вместе с циклом перемещается по фазовому пространству при изменении U_{ex} . Скорость движения состояния равновесия с течением времени определяется скоростью (частотой) изменения внешнего сигнала. Собственная же частота системы определяет скорость движения изображающей точки по траектории устойчивого предельного цикла. Тогда здесь можно выделить несколько режимов, которые выявлены исключительно при численном анализе системы дифференциальных уравнений, описывающих модель. Будем рассматривать гармонический внешний сигнал в виде синусоиды.

Моделирование спектральной динамики, полученной в эксперименте

На модели проведены расчёты сигналов и их спектров в случае частотной модуляции таламического сигнала внешним сигналом с линейно возрастающей частотой. Известно, что внешний сигнал поступает на кору через таламус.

Входной сенсорный сигнал является частотно-модулированным сигналом (в психофизическом эксперименте он аналогичен инфракрасному высокочастотному модулированному сигналу по отношению к собственной частоте сигнала ЭЭГ). Сигнал от переменной коры аналогичен интегральному биоэлектрическому сигналу ЭЭГ.

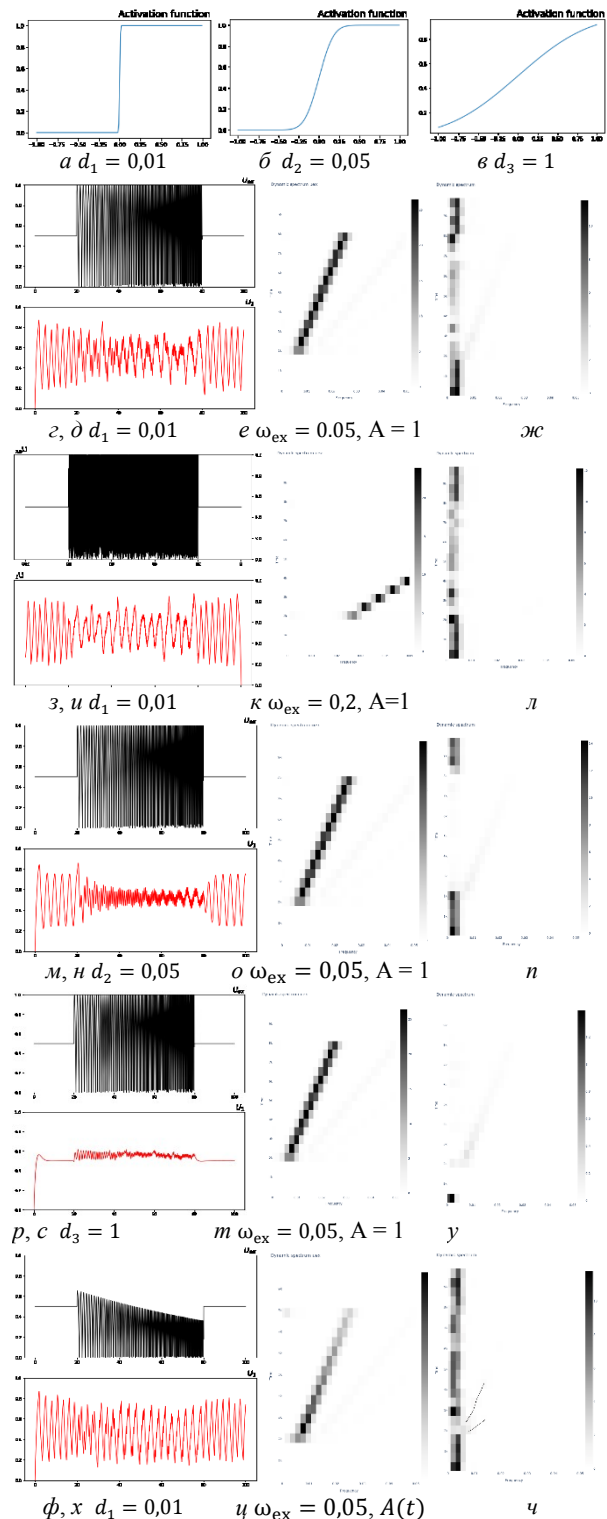


Рис. 4. Функции энергообеспечения $F[\cdot]$ в зависимости от параметра $d_1 = 0,01$ (а), $d_2 = 0,05$ (б), $d_3 = 1$ (в); з – зависимость от времени для внешнего сигнала и δ – сигнала таламической переменной, е – спектр внешнего сигнала, ж – спектр таламической переменной для случая $d_1 = 0,01$ от $\omega_{\text{ex}} = 0,05$, $A = 1$; з, и, к, л – аналогичные зависимости для $d_1 = 0,01$ в другом интервале частот внешнего сигнала от $\omega_{\text{ex}} = 0,2$, $A = 1$; м, н, о, п – аналогичные зависимости от времени для внешнего сигнала, спектр внешнего сигнала, спектр таламической переменной для случая $d_2 = 0,05$ от $\omega_{\text{ex}} = 0,05$, $A = 1$; р, с, т, у – аналогичные зависимости для $d_2 = 0,05$ от $\omega_{\text{ex}} = 0,05$, $A = 1$; ф, х, у, ч – аналогичные зависимости для $d_1 = 0,01$, $\omega_{\text{ex}} = 0,05$, $A = 0,8 \cdot e^{-0,01t}$. Амплитуда внешнего сигнала плавно спадает

В данной работе из всех параметров менялась только величина внешнего сигнала U_{ex} . Численные значения параметров: $k_i = 1, i = 1, 2, 3$; $\tau_i = 1, i = 1, 2, 3$; $T_1 = 0$; $T_2 = 0,5$; $T_3 = 0,5$; $k_{ex} = 1$; $k_{13} = 1$; $k_{21} = 1$; $k_{22} = 0$; $k_{32} = 1$. Функция энергообеспечения зависит от параметра d : чем больше, тем более пологая функция.

$$F_i = 0,5 \cdot \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t}{d} \right) \right) = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-z^2} dz \right)$$

Для U_{ex} был взят сигнал (7) (рис. 4, *г, з, м, р*), который аналогичен экспериментальному: частота осциллирующей части линейно возрастает в некотором интервале частот.

Выводы

На феноменологической модели нейропластичности получены аналогичные экспериментальным режимы, которые позволяют качественно объяснить некоторые механизмы возникновения различных резонансных режимов таламо-кортикальной системы (таблица 1). Исследование модели показало, что амплитуда внешнего сигнала является одним из важных управляющих параметров различных резонансных режимов в такой системе. Поэтому в сценариях биоуправления важно учитывать не только частотные (см. рис. 4), но и амплитудные характеристики внешнего сигнала (см. рис. 3, *б*). Можно усложнять модель, рассматривая, например, несколько взаимодействующих ячеек.

В задачах биоуправления важным является персонализированный подбор протокола процедуры. Эксперименты на модели с параметрами внешнего сигнала, возможно, помогут в разработке новых протоколов нейробиоуправления. В этом смысле модель является симулятором реакции персональной таламокортикальной системы испытуемого (пациента) на внешнее воздействие. В настоящий момент продолжается изучение условий, при которых модельные динамические режимы соответствуют данным экспериментов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ, грант № 22-18-20075.

Литература

1. Beard P. Biomedical photoacoustic imaging. *Interface Focus*. 2011;1(4):602–631.
2. Kaczmarek B.L.J. & Markiewicz K. (2021). Brain plasticity and the idea of the functional system // *Lurian Journal*, 2(2), pp. 46–62. DOI: 10.15826/Lurian.2021.2.2.3.
3. Федотчев А.И., Парин С.Б., Громов К.Н., Савчук Л.В., Полевая С.А. Комплексная обратная связь от биопотенциалов мозга и сердца в коррекции стрессиндуцированных состояний // *Журнал высшей нервной деятельности*. 2019. Т. 69. № 2. С. 187–193.
4. Федотчев А.И. Эффекты фотостимуляции, управляемой электроэнцефалограммой человека // *Биофизика*. 2019. Т. 64. № 2. С. 358–361.
5. Савчук Л.В., Полевая С.А., Парин С.Б., Бондарь А.Т., Федотчев А.И. Резонансное сканирование

Данные	Результаты расчетов
1. При закрытых глазах регистрируется активность в виде сигнала ЭЭГ с частотой альфа-ритма.	В ответ на постоянный сигнал заданной амплитуды $U_{ex} - \frac{T_1}{k_{ex}} = 0,5$ возникает импульсная активность с собственной частотой автоколебаний в таламокортикальной системе. Зависимость периода автоколебаний от амплитуды входного сигнала приведена на рис. 3, <i>б</i> .
2. Сформирован альфа-пик в спектре ЭЭГ.	Появление основного ритма зависит, кроме амплитуды внешнего сигнала и от параметра наклона d функции энергообеспечения $F[]$. Чем меньше d (крутая $F[]$), тем медленнее затухают колебания и поддерживается основной ритм, сопоставимый в эксперименте с альфа-ритмом (рис. 4, <i>г-ж, з-л, м-п</i>).
3. Не сформирован альфа-пик в спектре ЭЭГ.	При больших d (пологая $F[]$), основной ритм не формируется (рис. 4, <i>с-у</i>).
4. Наблюдаются резонансные спектральные пики на частоте стимуляции при сохранении альфа-ритма.	Рис. 4, <i>г-ж</i> . Сохраняется базовый ритм, происходит навязывание внешней частоты. При малой частоте внешнего сигнала происходит разделение колебаний на 2 частотных масштаба: частота огибающей откликов равна частоте внешнего сигнала; частота заполнения автоколебаниями – определяется параметрами системы.
5. Не наблюдаются резонансные спектральные пики на частоте стимуляции при сохранении альфа-ритма.	Частота экспериментального сигнала выше собственной частоты таламокортикальной системы (рис. 4, <i>з-л</i>). Базовый ритм сохраняется. Ритм не навязывается, а основной ритм модулируется высокочастотным сигналом.
6. Наблюдаются резонансные спектральные пики на частоте стимуляции, альфа-ритм не сохраняется.	Уменьшена частота основного ритма ввиду пологой функции $F[]$, что сопоставимо с переходом в другие низкочастотные дельта- и тета-диапазоны. Система работает в режиме вынужденных колебаний при подаче внешнего высокочастотного сигнала (рис. 4, <i>р-у</i>).
7. Мультипликация ритма при сохранении альфа-ритма (рис. 2, <i>б</i>).	Режим получается на модели с внешним сигналом с плавно спадающей амплитудой (рис. 4, <i>ф-ч</i>). На рис. 4, <i>ч</i> в динамическом спектре сигнала наблюдаются слабые линии на кратных частотах (прорисованы «карандашом»). Сохраняется базовый ритм, происходит навязывание и мультипликация ритма.

и анализ ЭЭГ при определении зрелости корковой ритмики у младших школьников // *Биофизика*. 2022. Т. 67, №2. С. 354–361.

6. Колосов А.В., Нуйдель И.В., Яхно В.Г. Исследование динамических режимов в математической модели элементарной таламокортикальной ячейки // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2016. Т. 24, вып. 5. С. 72–83. DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-5-72-83.

Отечественная школа электроэкологии: приоритеты, методы и перспективы

В.М. Ольшанский, В.Д. Барон, Д.В. Зленко

ИПЭЭ РАН, Москва, vmolsh@yandex.ru

Введение

Термин «электрические рыбы», употребляемый сегодня без кавычек, первоначально возник по отношению к рыбам, способным к генерации мощных (сотни ватт) и коротких (порядка миллисекунд) электрических разрядов [1]. К ним относятся электрические скаты *Torpediniformes*, электрические угри рода *Electrophorus*, электрические сомы рода *Malapterurus* и звездочеты рода *Astroscopus* [2]. Функция этих разрядов очевидна – оружие для нападения и защиты.

К слабоэлектрическим рыбам относят рыб из семейств *Gymnarchidae* и *Mormyridae*, а также отряда *Gymnotiformes*, постоянно (с частотой до единиц килогерц) генерирующих разряды с мощностями до единиц ватт. Функция этих разрядов – локация и коммуникация – была установлена в 1950-х Хансом Лиссманном [3, 4].

Первыми слабоэлектрическими рыбами, описанными еще в XIX веке, были ромботелые скаты *Rajiformes* [5]. Функция их эпизодических разрядов остается неизвестной, хотя они обладают высокой электрочувствительностью и физиологически способны воспринимать свои разряды [6]. Еще менее известно о функциях слабых эпизодических разрядов звездочетов рода *Uranoscopus* [7]. Известно лишь, что они наблюдаются перед атакой на жертву [6, 8].

Способность к спонтанной регулярной генерации коротких (единицы миллисекунд), слабых (десятки микровольт) разрядов одиночными особями была показана для сомов из рода *Synodontis* [8–11]. В процессе социальных взаимодействий амплитуда этих разрядов заметно возрастает, а паттерн и длительность могут изменяться [12].

Сомы семейства *Clariidae* способны генерировать маломощные (микроватты) разряды длительностью в 20–1000 мс [10]. Позже похожие эпизодические разряды с амплитудами порядка единиц милливольт были зарегистрированы от представителей других видов семейств *Claridae* и *Mochokiidae* [13–18], а также других семейств сомов – *Bagruidae* [19], *Claroteidae* [20], *Siluridae* [21–22] и *Plotosidae* [23]. Кроме того, слабые эпизодические разряды были зарегистрированы от полиптерусов [24], протоптерусов [25] и амфибии – гигантской китайской саламандры *Andrias davidianus* [26]. Функциональное значение всех этих сигналов остается невыясненным.

Приоритеты

В XVIII–XIX веках основными объектами исследований были сильноэлектрические рыбы, а основными проблемами – физика и физиология

электрогенерации. Конструкцию своего столба Вольта подглядел в структуре электрического органа угря [1].

После открытия Лиссманном электрорецепции [4] возник вопрос о роли электрических событий в жизни рыб и других водных существ. Электрочувствительными оказались не только многие рыбы, например, акулы, но и миноги, хвостатые амфибии и даже некоторые млекопитающие [27, 28]. В этом смысле электрическое чувство напоминает слух, которым обладает большинство позвоночных. При этом только некоторые животные (рукокрылые и китообразные) развили слух настолько, что научились ориентироваться в пространстве при помощи акустически сигналов, заменивших им зрение. Последнее напоминает то, как в процессе эволюции развились электролокационные способности мормирид и гимнотид для ориентации в пространстве.

Существенная сложность исследований эволюции электрических органов (как генерирующих сигналы, так и воспринимающих их) состоит в том, что в палеонтологической летописи нет следов этих бесскелетных образований. Однако, следуя рекомендации Лиссмана: «Представляется, что более тщательное исследование сомов будет плодотворным, поскольку пока не обнаружено переходных форм между сильноэлектрическим сомом и остальными сомами» [4, Р. 180], можно попытаться заменить палеонтологическую летопись сравнительными исследованиями ныне живущих животных. Реализуя эту идею, Лиссман и Мэйчин выбрали для экспериментов сома рода *Clarias* [29]. Способности к генерации электрических разрядов они не обнаружили, но показали, что эти рыбы обладают электрическим чувством. Позже электрические разряды от клариевых сомов были зарегистрированы, но они наблюдались только в ходе социальных взаимодействий [10]. Таким образом, сама по себе регистрация относительно редких и часто слабых электрических сигналов представляется существенной проблемой, не говоря о том, что функции этих, несомненно специализированных, сигналов остаются неизвестными.

Отечественная школа электроэкологии

Отечественная школа электроэкологии возникла по инициативе Владимира Рустамовича Протасова в конце 1960-х в Институте эволюционной морфологии и экологии животных (ИЭМЭЖ) АН СССР, ныне ИПЭЭ РАН. Следуя за Дарвином и Лиссманном, Протасов рассматривал сильноэлектрических рыб лишь как экзотические

проявления общего эволюционного процесса и общего биоразнообразия [30]. Однако специализация западных ученых, в первую очередь Карла Хопкинса и его учеников, на исследовании мормирид и гимнотид способствовала формированию мнения, что только эти две группы рыб можно признать слабоэлектрическими, в то время как все сомы, кроме *Malapterurus*, способны только воспринимать, но не генерировать разряды [31].

Протасов полагал, что электрических рыб гораздо больше и что среди ныне живущих рыб существуют переходные формы от неэлектрических рыб к сильноэлектрическим. И такие переходные формы должны генерировать сравнительно слабые, скорее всего достаточно протяженные и нерегулярные электрические сигналы.

Работы начались со сравнительных исследований черноморских звездочетов рода *Uranoscopus* и слабоэлектрических скатов *Raja clavata* [6, 7]. Были описаны гистологические и морфологические особенности электрогенерирующих структур и электрофизиологические механизмы генерации разрядов. Проводились поведенческие эксперименты с одновременной электрической и видеорегистрацией. Позже способность генерировать электрические разряды была показана для звездочетов, обитающих в Южно-Китайском море [8].

Исследования слабоэлектрических сомов начались в 1990 г. с работы американских авторов, зарегистрировавших слабые электрические разряды сомов рода *Synodontis*, источником которых является протракторная мышца, соединяющая позвоночный столб и плавательный пузырь [9]. В первой отечественной работе на этих рыбах было показано, что, несмотря на очевидное несоответствие частотных характеристик ампулярных электрорецепторов и генерируемых коротких разрядов, сомы *Synodontis* отвечают на них изменением ритма генерации собственных разрядов [15]. Более того, в процессе социальных взаимодействий амплитуда разрядов вырастала в сотни раз, заметно изменялась форма и длительность разрядов, что нехарактерно для специализированных мормирид и гимнотид [12].

Электрические разряды сомов рода *Clarias* были зарегистрированы в полевых условиях и наблюдались только в процессе социальных взаимодействий [10]. Длительность разрядов превышала 25 мс, что соответствует характеристикам ампулярных электрорецепторов [29]. Сомы рода *Clarias* представляются перспективным объектом для расширения понимания эволюционной истории электрических рыб и экологической роли электрических сигналов. Несмотря на небольшую мощность, эти сомы могут воспринимать сигналы сородичей и генерируют их только в ходе социальных взаимодействий, в том числе драк или спаривания. Последнее однозначно свидетельствует о коммуникационной функции разрядов, хоть и неизвестно точно, что они означают.

Удалось показать, что генерация особой «нерестовой» пачки электрических разрядов

Clarias, не наблюдаемой в других ситуациях, является обязательным элементом нерестового ритуала [32, 33]. Генерирует нерестовую пачку электрических разрядов самка, происходит это примерно за 100 мс до выметывания икры. Голова самца в этот момент прижата скулой к боку самки в том месте, где расположены яичники. Основная гипотеза состояла в том, что нерестовая пачка разрядов служит сигналом к тому, чтобы самец, надавив скулой на бок самки, облегчил икрOMETание. Более того, если бы разряды имели большую амплитуду, можно было бы предположить, что судорога, вызванная нерестовой пачкой, способна облегчить икрOMETание вне зависимости от желаний самца.

Это предположение позволяет проследить один из возможных эволюционных путей от коммуникационной функции у слабоэлектрических рыб к оружию сильноэлектрических. Действительно, несмотря на существующую гигантскую разницу в мощности разрядов, как только увеличение мощности, пусть только в процессе нереста, попадет под положительное давление отбора, мощность разрядов начнет расти. У более мощных разрядов появятся новые функции, отбор усилится и, в конце концов, приведет к появлению сильноэлектрической рыбы, почти все тело которой будет представлять собой огромный электрический орган.

Особенности методов

Успех отечественной школы в регистрации и описании электрических разрядов слабоэлектрических сомов в значительной степени был обеспечен разработками в области средств регистрации. Поскольку рыбы могут генерировать разряды очень редко, аппаратура должна была работать в ждущем режиме, позволяющем зафиксировать все электрические события [34]. Поскольку длительность разрядов может достигать секунд, то нижняя частота регистрации должна составлять сотые доли герца. Обязательным условием эксперимента по проверке способностей рыб к электрогенерации стала организация поведенческих экспериментов с участием нескольких особей, в условиях максимально приближенных к натуральным и с соответствующим периодом адаптации.

Помимо этого, использование многоэлектродных систем позволило анализировать пространственные компоненты электрического поля [35]. Параллельная регистрация электрической активности рыб и запись на видео процессов, происходящих в экспериментальном аквариуме, позволяет идентифицировать источник электрического сигнала. Последнее позволяет, с одной стороны, установить, является ли источником сигнала рыба, а с другой – определить, какая именно, если их в эксперименте несколько [36].

Перспективы исследований

Рассматривая эволюционные пути возникновения электрогенерирующих структур, нетрудно

заметить множество параллельных конвергентных путей [2]. В самом деле, у скатов *Torpediniformes* электрические органы расположены по бокам тела, в то время как у скатов *Rajiformes* – в хвосте. У сильноэлектрических звездочетов *Astroscopus* – на голове, а у слабоэлектрических *Uranoscopus* – на спине. Следовательно, существует множество примеров возникновения и развития электрогенераторных органов, находящихся на разных стадиях эволюционного развития. Подробный сравнительный анализ этих примеров мог бы пролить свет на то, как эволюционировали современные сильноэлектрические рыбы.

Отметим, что поиск новых электрически активных видов оказывается тем сложнее, чем менее продвинута их электрогенераторная система. С другой стороны, именно такие случаи наиболее интересны с точки зрения исследования процессов эволюционного становления этих систем. Более того, для понимания того, как развивается и эволюционирует та или иная система органов, необходимо выяснить ее функции. Без этого невозможно понять, как действовал отбор и почему развитие пошло именно так, а не иначе.

Степень очевидности функций электрических разрядов, которые генерируют рыбы, стремительно убывает при переходе от высокоспециализированных рыб к менее специализированным. Так, нет сомнений в том, что электрические угри, скаты и сомы используют разряды во время охоты и для защиты от врагов. Для того, чтобы доказать способность также сравнительно высокоспециализированных мормирид и гимнотид к электролокации и электрокоммуникации, потребовались дополнительные исследования, и в итоге функции электрических разрядов были точно установлены [4, 27, 28]. Но уже в случае сомов *Synodontis*, хотя ведущие западные специалисты и используют термины «электрокоммуникация» и «электролокация» [37, 38], никаких надежных доказательств этих функций для этих рыб не приводится. Более того, длительность их разрядов (единицы миллисекунд) не позволяет им самим воспринимать собственные разряды при помощи обнаруженных у них ампулярных электрорецепторов [27, 28]. Подобные казусы нередки; например, электрорецепторы вовсе не были обнаружены у электрически активных звездочетов *Uranoscopus* [6].

Несмотря на все перечисленные сложности, на наш взгляд, наиболее существенной является проблема анализа и интерпретации полученных в эксперименте данных. У нас в руках теперь есть мощный инструмент визуализации электрических событий, позволяющий сопоставить во времени и пространстве картину электрического поля, растраемое изображение экспериментального аквариума и аудиоряд (в виде фото или видео файла). Однако сами по себе эти данные требуют вдумчивого и нетривиального анализа, направленного на установление связи между событиями, наблюдаемыми в видео- и аудио-каналах с теми событиями, которые имели место в электрической записи.

Мы полагаем, что к анализу полученных массивов данных поведенческих экспериментов могут подключиться другие исследователи, располагающие только компьютером, способностью к аналитической работе и желанием поучаствовать. Представляется принципиально важным иметь площадку, на которой в открытом доступе будут доступны исходные электрические и видеозаписи. Видеозаписи позволят ихтиологам увидеть корреляции между электрическими событиями и наблюдаемым поведением рыб. Электрические данные позволят программистам и специалистам по обработке данных предложить новые методы их анализа – и, может быть, версии смысловых интерпретаций.

Литература

1. Finger S., Piccolino M. The shocking history of electric fishes: From ancient epochs to the birth of modern neurophysiology. Oxford University Press. Oxford, UK. 2011.
2. Bennett M.V.L. Electric organs. In Fish Physiology (ed. W.S. Hoar, D.J. Randall). NY, Acad. Press 1971. 5: 347–491.
3. Lissmann H.W. Continuous electric signals from the tail of fish, *Gymnarchus niloticus*. Nature. 1951. 167: 201.
4. Lissmann H.W. On the function and evolution of electric organs in fish. J. Exp. Biol. 1958. 35: 156–191.
5. Robin C. Mémoire sur la démonstration expérimentale de la production d'électricité par un appareil propre aux poissons du genre des raies. J. Anat. Physiol. 1865. 23: 577–645.
6. Baron V.D. Possible role of electroreception in the behavior of weakly electric fishes. Sens. Syst. 1994. 8: 217–224.
7. Baron V.D., Mikhailenko N.A. *Uranoscopus scaber*, a transitional form in the evolution of electric organs in fishes. Dokl. Biol. Sci. 1976. 265: 290–293.
8. Baron V.D. Electric discharges of two species of Stargazers from the South China Sea (*Uranoscopidae*, *Perciformes*). J. Ichthyol. 2009. 49: 1065–1072.
9. Hagedorn M., Womble M., Finger T.E. Synodontid catfish: A new group of weakly electric fish. Brain. Behav. Evol. 1990. 35: 268–277.
10. Baron V.D., Orlov A.A., Golubtsov A.S. African Clarias catfish elicits long-lasting weakly electric pulses. Experientia. 1994. 50: 664–647.
11. Boyle K.S., Colleye O., Parmentier E. Sound production toelectric discharge: Sonic muscle evolution in progress in *Synodontis* spp. Catfishes (Mochokidae). Proc. Royal. Soc. B. 2014. London. 281: 20141197.
12. Baron V.D., Morshnev K.S., Olshansky V.M., Orlov A.A. Electric organ discharges of two species of African catfish (*Synodontis*) during social behavior. Anim. Behav. 1994. 48: 1472–1475.
13. Baron V.D., Orlov A.A., Morshnev K.S. Triggering of electric discharges in catfish *Synodontis serratus* and *Clarias gariepinus*. J. Ichthyol. 2002. 42(Suppl 2): S223–S230.
14. Ol'shanskii V.M., Morshnev K.S., Naseka A.M., Nguyen T.N. Electric discharges of clariid catfishes cultivated in South Vietnam. J. Ichthyol. 2002. 42: 477–484.
15. Orlov A.A., Baron V.D., Ol'shanskii V.M. Electro-generating activity in *Synodontis* and its modification under

- weak electric fields. Dokl. Akad. Nauk SSSR. 1993. 332: 108–111.
16. Orlov A.A., Baron V.D. Responses of the electro-generation system of *Synodontis* (Mochokidae, Siluriformes) to weak electric fields. Dokl. Biol. Sci. 2005. 403: 284–287.
 17. Orlov A.A., Baron V.D., Golubtsov A.S. Electro-genesis in two African upside-down catfishes, *Synodontis sorex* and *S. batensode* (Mochokidae, Siluriformes). Dokl. Biol. Sci. 2019. 487: 124–127.
 18. Baron V.D., Orlov A.A., Elyashev D.E. Investigation of electric and acoustic activity of some representatives of the ichthyofauna of Southern Vietnam. J. Ichthyol. 2005. 45(Suppl 2): S271–S279.
 19. Baron V.D., Orlov A.A., Golubtsov A.S. Discovery of electric discharges in African catfish *Aucheloglanis occidentalis* (Siluriformes, Bagridae). Dokl. Biol. Sci. 1996. 349: 565–567.
 20. Orlov A.A., Baron V.D., Golubtsov A.S. Electric discharges of two African catfishes of the genus *Auchenoglanis* (Claroteidae, Siluriformes). Dokl. Biol. Sci. 2015. 462: 370–372.
 21. Morshnev K.S., Olshansky V.M. Electric discharges of *Ompok bimaculatus* (Siluridae). Doklady RAN. 1997. 354(3): 419–422.
 22. Baron V.D., Olshanskiy V.M. Monopolar electric discharges of the catfish *Parasilurus asotus* (Siluridae, Siluriformes). J. Ichthyol. 2009. 49: 403–408.
 23. Baron V.D., Orlov A.A. Functional characteristics of central neurons of the electroreceptive system of the Sea Catfish *Plotosus anguillaris*. Biophysics. 2005. 50: 112–118.
 24. Baron V.D., Pavlov D.S. Discovery of specialized electrogenerating activity in two species of *Polypterus* (Polypteriformes, Osteichthyes). J. Ichthyol. 2003. 43(Suppl 2): S259–S261.
 25. Orlov A.A., Golubtsov A.S., Baron V.D., Pavlov D.S. Bioelectric fields of the African marbled lungfish *Protopterus aethiopicus* (Sarcopterygii: Protopterygidae), African (*Heterotis niloticus*) and South American Silver (*Osteoglossum bicirrhosum*) Arowanas (Actinopterygii: Osteoglossidae): Primitive electrogenesis? J. Ichthyol. 2015. 55: 874–879.
 26. Olshanskii V.M., Baron V.D., Xue W. Electrical discharges in Chinese salamander *Andrias davidianus*. Dokl. Biochem. Biophys. 2016. 471: 447–449.
 27. Bullock T.H., Heiligenberg W. Electroreception. Wiley, New York. 1986.
 28. Bullock T.H., Hopkins C.D., Popper A.N., Fay R.R. Electroreception. New York. 2005. Springer.
 29. Lissmann H.W., Machin K.E. Electric receptors in a nonelectric fish (*Clarias*). Nature. 1963. 199: 88–89.
 30. Протасов В.П., Бондарчук А.И., Ольшанский В.М. Введение в электроэкологию. М. : Наука. 1982. 336 с.
 31. Nelson M.E. Electric fish. Curr. Biol. 2011. 21(14): R528–529.
 32. Ol'shanskii V.M., Soldatova O.A., Nguyen T.N. Episodic electric discharges in the course of social interactions: an example of Asian Clariidae catfish. Biol. Bull. Rev. 2011. 1: 458–470.
 33. Olshanskiy V.M., Kasumyan A.O., Moller P. On mating and function of associated electric pulses in *Clarias microcephalus*: Probing an old puzzle, first posed by Charles Darwin. Environmental Biol. of Fishes. Günther. 1864. 103: 99–114.
 34. Olshansky V.M. Elaboration of equipment and methods of continuous recording of electric activity of clariid catfish (Clariidae, Siluriformes) in social and reproductive behavior. J. Ichthyol. 2010. 50: 1077–1091.
 35. Olshansky V.M., Zlenko D.V., Orlov A.A., Kasumyan A.O., Moller P., MacMahon E., Xue W. Multielectrode registration of episodic discharges generated by weakly electric fishes. Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. 30(2): 239–252.
 36. Olshansky V.M., Zlenko D.V., Orlov A.A., Kasumyan A.O., Moller P., MacMahon E., Xue W. Visualization of Electric Fields and Associated Behavior in Fish and other Aquatic Animals. Behavior Research Methods. 2023, in press.
 37. Kever L., Parmentier E., Bass A.H., Chagnaud B.P. Morphological diversity of acoustic and electric communication systems of mochokid cat fish. The Journal of Comparative Neurology. 2021. 529(8): 1787–1809.
 38. Dunlap K.D., Koukos H.M., Chagnaud B.P., Zakon H.H., Bass A.H. Vocal and electric fish: Revisiting a comparison of two teleost models in the neuroethology of social behavior. Frontiers in Neural Circuits. 2021. 15: 713105.

Нелинейность и рефлексивность транскультурной экспансии в становлении ноосферы

С.В. Палагин

Саратов, palaginsv2007@yandex.ru

Нелинейность и рефлексивность свойственны всем транскультурным переходам, но у каждого из них есть свои особенности. Сравнение идущего в настоящее время транскультурного перехода к ноосфере с предыдущими позволяет лучше понимать его и с этим занимать не просто активную позицию, но научно продуманную и просчитанную.

Мы знаем, что любой транскультурный переход в социуме – это тот же фазовый переход в самоорганизующейся, эволюционирующей и самоэволюционирующей системе. При этом сложность и уровневость социальных систем таковы, что мы должны принимать во внимание одновременно идущие в них и циклы оперативной самоорганизации, и оба культурогенеза – пассивный и активный.

Развитие когнитивной культуры, и в том числе ее рефлексивной составляющей, меняет не только качество всех этих слагаемых, но и их внутренние пропорции. Так, развитие рефлексии от узнаваемой в первобытном мире до осознаваемой в Новое время закономерно ведет к тому, что доля активного культурогенеза по отношению к пассивному увеличивается. Пассионарии культурогенеза все более сознательно, научно и технологично реализуют свои проекты, а общество, сознавая их пользу, все живее на них откликается и быстрее превращает в культурную норму. Казалось бы, такой процесс постепенного роста культуры должен быть относительно линейен, но нет! Почему же тогда с определенной периодичностью он входит в нелинейный режим, и в обществе происходят революции? Буржуазные, социалистические, капиталистические? Почему развитие культуры в определенные исторические моменты оборачивается вооруженными столкновениями и пролитой кровью?

На этот вопрос мы смогли ответить только в самое последнее время, ознакомившись с закономерностями нелинейной динамики как самоорганизующихся, так и самоэволюционирующих систем, причем систем уровнейых, в которых процессы на более глубоких структурных уровнях определяют расклады событий на уровнях более высоких. Это является наглядной интерпретацией закона самоорганизации материи из своих структурных глубин, открытого относительно недавно, но уже освоенного нами в 3-й научной парадигме [1].

Знакомство с законами эволюционирования самоорганизующихся систем позволяет нам доказательно проследить те пропорции развития, которые в одни исторические периоды определяют ламинарное течение культурного развития, а в другие – турбулентного.

Знание природы самоорганизованности человека позволяет нам правильно выделять причинно-следственные отношения, которые проявляются в его уровневом строении. Самые глубинные процессы – это когнитивные. Когнитивная самоорганизация (в эмоционально-волевом обрамлении) определяет поведенческую самореализацию. Для общества эта формула имеет чуть иную трактовку, но суть ее остается той же: насколько совершенна когнитивная культура общества – настолько гармонично и эффективно оно живет. Когда мы не удовлетворены культурой субъекта, то его образ жизни оцениваем как варварский.

Обратим внимание на то, что человеческий мозг с комплексом логико-поведенческих когнитивных культур на доноосферной стадии развития работает прежде всего как самостабилизирующийся орган, которому надо сохранять внутреннюю устойчивость среди перипетий конкуренции. Осознанный культурогенез и активное личностное развитие для него – еще в будущем, а наработка и накопление новых возможностей в пассивном культурогенезе идет очень и очень постепенно. Доноосферное мышление подавляющего большинства в социуме – догматично и консервативно, а это значит, что накопление новых знаний и идей идет как бы вразрез с его доминирующей жизненной позицией.

Но общество – это эволюционирующая единица с полидисперсным распределением, в которой природа отвела культурным пассионариям и свою законную долю. Мы знаем, что за сохранение в пассивном культурогенезе накопленного культурного потенциала отвечает консервативная часть общества, а за активное повышение этого потенциала – пассионарная часть общества. Воинствующие отношения изобретателей и догматиков – это белый хаос развития человечества. И, если мы смотрим в глубь и суть событий, – это не просто отношения людей с разными жизненными позициями, это столкновения людей с разными когнитивными культурами и разными способностями к оперативной культурной самоорганизации, которая проявляется в социально-ролевой организованности через личностную и ролевую экспансию.

Поскольку культурогенез не останавливается, в обществе со временем назревает когнитивный, и потому культурный раскол. С одной стороны, в этом расколе видят распространение революционных идей и недопустимого вольнодумства, а с другой – желание сохранить эксплуататорские и во многом бесправные отношения между меньшинством и большинством. Назревают условия, в которых культура борьбы за новые социальные

отношения среди попираемого большинства растет лавинообразно: это революционная ситуация. Чем дольше она назревает, тем больше общество утрачивает свою внутреннюю устойчивость.

Происходящая далее революция – это транскультурный переход, который его пассионарии совершают силой, ибо они не видят другого способа установить новую культуру иначе, как насильственно убрать субъектов устаревшей культуры. Последние, живя пассивным, и потому чрезвычайно медленным культурогенезом, не обладают рефлексивными способностями понять когнитивную суть ситуации и (как минимум) подстроиться под нее, – и потому «отстают от жизни» и оказываются побежденными.

Главное достижение победителей в том, что они свою когнитивную культуру делают доминирующей. После революций (буржуазных, социалистических) восстановление социальной упорядоченности на новой когнитивной культуре идет по сукцессии. Новые общественные и государственные лидеры вырабатывают новую культуру социальной самоорганизованности, послереволюционный хаос спадает, а историческое развитие возвращается в ламинарное русло.

При приближении к ноосферному транскультурному переходу пропорции оперативной самоорганизации, пассивного и активного культурогенеза становятся иными:

- возрастает адекватность и эффективность социальной самоорганизации (благодаря той же службе HR-менеджмента, другим социальным службам),

- возрастает текущая оперативность социальной самоорганизации (благодаря средствам массовой коммуникации),

- активный культурогенез, выстраиваемый на поставленной на поток науке, все более подминает под себя культурогенез пассивный, задаваемый дарвиновским механизмом отбора и случайными культурными девиациями (= мутациями),

- возрастает личная когнитивная мобильность интеллектуальной элиты,

- возрастает общая когнитивная хаотичность из-за низких темпов развития осознаваемого рефлексигенеза,

- возрастает общая информационная перегруженность культурного пространства от агрессивной информационной экспансии каждого хоть сколько-нибудь информационно активного субъекта,

- возрастает когнитивное и, следовательно, культурное + экономическое расслоение общества. На одном его полюсе скапливается все больше привластных миллиардеров, а на другом – народные массы, живущие либо по одну, либо по другую сторону уровня бедности. Средний класс как бы размывается и численно сдает свои позиции,

- научное сообщество человечества переживает два транспарадигмальных перехода и, после открытия синергетики и нелинейной динамики,

осваивается в понимании самоорганизующихся систем в 3-й научной парадигме. И концептуально отражает само человечество как планетарную самоорганизующуюся и самоэволюционирующую систему.

Однако, несмотря на все вышеперечисленные факторы, прогресс доноосферного человечества продолжается с сохраняющимися внутренними противоречиями, перекосами, а также культурными, субкультурными и контркультурными девиациями. И это закономерно: когнитивная культура продолжает находиться в статусе созревающей, люди живут очень разными картинками мира, с разной рефлексией, разными ментальностями и разными интересами. Человечество в целом продолжает жить своей плохо осознаваемой экономической и техногенной экспансией и все более втягивает себя в экологический кризис и приближающуюся климатическую катастрофу. Ламинарное течение истории постепенно утрачивается, и в нем то тут, то там возникают островки нежелательной турбулентности. И эти островки турбулентности имеют не только социальную природу: глобальное потепление закономерно оборачивается повышенной климатической нестабильностью: растет число тайфунов, ураганов, засух, лесных пожаров и наводнений [2].

В этих условиях пассионарии ноосферной транскультурной экспансии все больше сознают свою ответственность за будущее и все настойчивее стараются заявить о себе. Ибо только человеческий разум, полностью осознающий свои возможности, может стать пейсмейкером самоорганизующегося человечества, сумевшего свою неосознаваемую экспансию превратить в осознанную и управляемую.

Отвечая на вызов текущей эпохи, мы должны задать своему созревшему Разуму такую нелинейность влияния, которой смогли бы компенсировать объективную нелинейность своего развития... Это возможно через рефлекссию, так как она – главный фактор, придающий когнитивной культуре максимальный динамизм развития. Но, к сожалению, рефлексии суждено развиваться с относительно большим запозданием, так как для ее научного возмужания требуется не только достаточный объем когнитологических знаний, но и созревшая до 4-й парадигмы общая научная культура [3].

Параллельно с этим мы должны ответить на вопрос, какими еще нелинейными факторами характеризуется предноосферный хаос, в котором ноосферным пассионариям предстоит работать? Эти нелинейные факторы следующие:

- чрезвычайное разнообразие когнитивных культур,

- огромные культурные различия, культурная неоднородность даже среди близких соотечественников и родственников,

- когнитивная и психическая защищенность,

- закреплённость в долгосрочной памяти нарабатанной с детства когнитивной культуры,

- самостоятельная встречная информационная, культурная и транскультурная экспансия всех активных субъектов (от отдельного человека до государства),

- незрелость мышления у молодежи с малыми знаниями и малым жизненным опытом,

- клиповость мышления у молодежи и уже у людей среднего возраста, их неспособность к серьезным концептуальным размышлениям [4],

- заостренность личных когнитивных типов у пожилого поколения, обладающего значительными знаниями и богатым жизненным опытом, их консервативная жизненная позиция,

- коллективность когнитивной и культурной организованности, которая сдерживает личные транскультурные намерения отдельных интеллектуально активных соотечественников, которые решаются мыслить и жить «не так как все». На таких «вероотступников» свои кланы, общины, тейпы, семьи, партийные организации и т. п. оказывают сдерживающее давление, чем не позволяют свободно воспринимать новое и пробовать жить им,

- мозг человека работает практически с максимальной отдачей, и воспринять значительную дополнительную нагрузку просто так не может. Чтобы он начал ноосферную пересаморганизацию, это надо делать либо очень постепенно (но тогда смысл?.. время не ждет!), либо значительно разгрузать мозг (например, для транскультурного перехода уходить в отпуск и в аскезу),

- пофигистское настроение у большинства пожилых людей, с которыми они считают себя слишком старыми, чтобы участвовать в каких-либо нововведениях,

- неявно развязанная врагами против государства, в котором живет ноосферный пассионарий, информационная, ментальная и когнитивная война, акторы которой навязывают его гражданам не только фейки, но и ложные смыслы. Это дополнительно хаотизирует пространство культуры, в котором надо создать новую упорядоченность [5],

- формализм в работе и практическая неспособность государственных управляющих структур (читай: чиновничества) адекватно воспринимать и доводить до руководства идущие от народа и от пассионариев научные инициативы и предложения.

Вывод

Рассмотренный в статье комплекс факторов предноосферного хаоса позволяет предположить, что на быстрые достижения в своей осознанной экспансии ноосферным пассионариям рассчитывать не приходится. Совершение транскогнитивного перехода к Ноосферному Разуму требует значительных личных усилий, а для этого, в свою очередь, нужна хорошо развитая осознанная научная (не философская!) рефлексия.

Можно очень красиво, наглядно и даже душещипательно взывать о необходимости создания ноосферного общества, в жанре триллера расписывать то ужасное будущее, которое ждет человечество в противоположном случае, но если это делать доноосферным мышлением и этот факт не рефлексировать, то свою неосознаваемую экспансию человечество будет продолжать и продолжать. Пока не исчерпает планетарные ресурсы и не самоуничтожится.

Литература

1. *Стёпин В.С.* Теоретическое знание. М. : Прогресс-Традиция. 2003. С. 641.
2. Последствия изменения климата / https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.
3. *Палагин С.* Ноосферное мышление, или Что такое нофукома в интеллекте ноосферянина. М. : Родина, 2021. С. 66.
4. *Гирёнок Ф.* Клиповое мышление / <https://lgz.ru/article/-49-6490-10-12-2014/klipovoe-myshlenie/>.
5. *Ильницкий А.М.* Ментальная война России // Военная мысль. 16 августа 2021 г. / <https://vm.ric.mil.ru/Stati/item/336904/>.

Сознание как оно есть?

С.Б. Парин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
parins@mail.ru

Постановка проблемы

Сразу необходимо принести извинения за провокационный заголовок статьи. Это вариации на тему: казнить нельзя помиловать. Можно представить себе, насколько эпатажным покажется многим отечественным психологам этот вопросительный знак. Они-то твердо знают, что такое сознание. Ведь вся психология делится на когнитивную и аффективную. Первая изучает сознание, вторая – эмоции. И про них в учебниках уже все написано.

Автор всю свою сознательную жизнь задумывался над определением сознания, более четверти века плотно сотрудничает с психологами, но вынужден со стыдом признать, что внимательное чтение учебников, монографий и статей так и не привело его к просветлению в этой сфере. Проведенный в прошлом году эксперимент только усугубил проблему: откликнувшиеся на предложение найти в литературе определения сознания студенты с садистским удовольствием представили лекцию из более чем сотни формулировок.

В рамках решения В.И. Лениным основного вопроса философии он дает определение материи, которая «есть философская категория для обозначения объективной реальности, которая дана человеку в ощущениях его, которая копируется, фотографируется, отображается нашими ощущениями, существуя независимо от них» [1]. Соответственно, сознание – это «продукт деятельности высокоорганизованной материи – человеческого мозга». Нам в 1960-х это было совершенно понятно. Современным студентам – нет. Они уверяют, что это «циклическая ссылка» и «деление на ноль». Спорить трудно... Хорошо все же, что искренне уважаемый вождь не был психологом.

Но, опираясь на его рассуждения, современные психологи породили целый рой аналогичных монстров. Чтобы не позорить создателей, приведем ряд образчиков без ссылок на авторов.

«Сознание – это высшая форма психического отражения действительности, свойственная исключительно общественно развитому человеку и связанная с речью, идеальная сторона целенаправленной деятельности». Каждое утверждение, по сути, ложно. Во-первых, наш мозг ровным счетом ничего не отражает (покойтесь с миром, рефлексивная теория и основанная на ней ленинская теория отражения!), а предсказывает на основании предыдущего опыта [2]. Во-вторых, речь и сознание – разделенные реальности. В-третьих, сознание свойственно далеко не только человеку. Последнее утверждение постарается доказать данная статья.

Ниже – еще ряд откровений.

Сознание – это мысль, чувство.

Это способность мыслить, рассуждать и определять свое отношение к действительности как свойство высшей нервной деятельности человека.

Сознание есть форма или способ данности предмета, форма или способ данности мира вообще.

Многообразие различий и их различий (первичный опыт), а также предпочтений (выделение того или иного элемента различаемого в качестве переднего плана) и идентификаций различенного (вы что-нибудь поняли?).

Связь одновременных и сменяющих друг друга во времени психических процессов, которая ведет к познанию действительности и регулированию взаимоотношений личности с окружающим миром.

Все то, что осознается в данный момент времени (конгениально!).

Сознание должно быть понято как реакция организма на свои же собственные реакции (рефлекс рефлексов).

То, что можно потерять, если сильно удариться головой (абсолютно непроверяемо!).

Наиболее адекватным выглядит следующее определение: сознание – это механизм согласования индивидуального и коллективного опыта на основе интеграции информационных образов (С.А. Полевая – персональное сообщение).

Но в любом случае приходится признать, что сегодня мы можем говорить только о рабочей гипотезе и, соответственно, рабочем определении сознания. И причина очевидна: несмотря на все достижения науки, мы находимся только в начале пути к решению самой сложной в истории человечества проблемы. В самом деле, нам предстоит с помощью нашего сознания определить, что такое наше сознание (!!!).

Очевидно, ждать, когда станет возможным дать исчерпывающее определение сознания, значит – потерять все шансы на его понимание. Необходимо поступить так, как в середине XX века поступили нейрофизиологи, столкнувшиеся со сверхсложностью человеческого мозга: унять гордыню, отступить на несколько шагов назад и исследовать уникальный феномен, начиная с более простых уровней.

Декларация о сознании

Именно так предлагает подступить к изучению сознания знаменитая сегодня «Кембриджская декларация о сознании» [3].

Во время представительной международной конференции 7 июля 2012 года группа виднейших

когнитивных нейробиологов, нейрофармакологов, нейрофизиологов, нейроанатомов и специалистов по искусственному интеллекту собралась в мемориальном зале Нобелевского лауреата Фрэнсиса Крика в Кембриджском университете «для переоценки нейробиологических субстратов сознания и связанного с ним поведения у людей и животных». В результате дискуссии была сформулирована Декларация.

«Виднейшие» когнитивисты здесь не преувеличение. Вот хотя бы некоторые из них:

Бруно ван Свиндерен – молекулярный генетик, изучающий проблемы формирования сознания на таком объекте, как *Drosophila melanogaster*. В основе его экспериментальной модели – три варианта измененного сознания: анестезия, сон и избирательное внимание.

Як Панксепп – нейробиолог, сформировавший самостоятельное научное направление: аффективную нейронауку, изучающую нейронные механизмы эмоций. Он выделил у животных семь наследуемых первичных аффективных систем: поиск, страх, гнев, возжеление, забота, паника/горе и игра. Кроме того, он исследовал нейрофизиологические механизмы страха и смеха у крыс и заслужил широкую известность, выдвинув опиоидную гипотезу аутизма.

Дэвид Эдельман – клеточный нейробиолог, который изучает эволюционные механизмы сознания на таком экзотическом объекте, как осьминог. Во многом благодаря его работам мы сегодня относим этих моллюсков к высшей касте, «приматам» моря.

Филип Стивен Лоу – один из ведущих системных нейробиологов, предложивший оригинальную гипотезу происхождения ритмов ЭЭГ и целую линейку устройств для мобильной регистрации биоэлектрической активности мозга. Еще одна сфера его интересов – искусственный интеллект.

Дайана Рейсс – крупнейший специалист по психике дельфинов. Наибольшую известность ей принесли труды по изучению семантики и синтаксиса языка дельфинов. Она была в числе тех исследователей, которые установили, что у дельфинов есть собственные имена и даже фамилии.

Айрин Пепперберг – тоже «зоолингвист». Обученные по ее авторской методике попугаи овладевают богатым (250–300 слов) словарным запасом, которым пользуются сознательно, ведя длительные «светские беседы» с интервьюерами.

Кристофер Кох – один из ближайших учеников Нобелевского лауреата Фрэнсиса Крика и один из создателей методологии современной когнитивной науки.

Наконец, оглашение Декларации было освящено Стивеном Уильямом Хокингом, представлять которого излишне.

Тезисно, основные положения Декларации (изложенные, кстати сказать, в жесткой и однозначной форме) заключаются в следующем:

– так как большинство людей и других животных не способно четко вербализовать особенности

своего сознания, в основе исследований должны лежать исключительно объективные методы его исследования;

– у человека и других животных обнаружены гомологичные нейронные сети, локальное фармакологическое или инструментальное выключение которых приводит к аналогичным изменениям функций сознания;

– нейронные субстраты эмоций не ограничиваются корковыми структурами. Искусственная стимуляция гомологичных регионов мозга порождает соответствующие состояния поведения и чувств как у людей, так и у других животных;

– нейронные сети, поддерживающие поведенческие/электрофизиологические паттерны внимания, сна и принятия решений, возникли в эволюции еще на стадии радиации беспозвоночных, что проявляется у насекомых и головоногих моллюсков (например, осьминогов);

– птицы своим поведением, нейрофизиологией и нейроанатомией являются ярким примером параллельной эволюции сознания. Доказательства почти человеческих уровней сознания наиболее убедительно продемонстрированы у африканских серых попугаев;

– у некоторых видов птиц (например, зебровых зябликов) наблюдаются нейронные паттерны сна, аналогичные таковым у млекопитающих, включая стадию быстрого движения глаз;

– у сорок (и врановых в целом) показано паразитическое сходство с людьми, человекообразными обезьянами, дельфинами и слонами в исследованиях зеркального самосознания;

– фармакологические вмешательства с помощью соединений, которые влияют на сознательное поведение людей, приводят к аналогичным нарушениям в поведении других животных;

– у человека и других животных эмоции и чувства формируются в гомологичных подкорковых сетях мозга.

Резюме Декларации заслуживает полного воспроизведения: «Отсутствие неокортекса не исключает возможности испытывать аффективные состояния. Конвергентные данные указывают на то, что животные, не являющиеся людьми, обладают нейроанатомическими, нейрохимическими и нейрофизиологическими субстратами сознательных состояний наряду со способностью демонстрировать намеренное поведение. Следовательно, масса доказательств указывает на то, что люди не уникальны в том, что обладают неврологическими субстратами, порождающими сознание. Животные, включая всех млекопитающих и птиц, и многие другие существа, включая осьминогов, также обладают этими неврологическими субстратами».

По существу, эта Декларация, во-первых, снимает с животных многовековое (отчасти, религиозное) проклятие, мракобесно лишавшее их права на наличие мышления, эмоций и сознания. Во-вторых, она открывает новые перспективы для исследования объективных коррелятов сознания. Наконец, она уже стала поворотным пунктом в развитии психологии и когнитивной науки.

Однако необходимо признать, что, наряду с перечисленными в Декларации аргументами, существует целый ряд других доказательств наличия сознания у животных, не относящихся к людям. Это и организация социальных структур, сопоставимых по сложности с человеческим обществом, и наличие долгосрочного планирования индивидуального и группового поведения, и изготовление орудий труда для изготовления орудий труда, и способность к абстрактному мышлению, включая экстраполяцию, и своеобразный «бизнес», включающий элементы бартера, накопления богатства и, страшно подумать, воровства и разбоя, и многое другое. Для заинтересовавшихся этой проблемой следует рекомендовать, прежде всего, публикации классиков отечественной зоопсихологии и этологии З.А. Зориной и Ж.И. Резниковой [4–7].

Здесь же необходимо остановиться на еще одном доказательстве наличия сознания у животных. Речь пойдет об их языках.

Метод «искусственных» языков

Способность животных разговаривать подозревается человечеством с момента его возникновения, что нашло отражение в многочисленных мифах, легендах и сказках, по существу, всех народов мира. Однако мировые религии, а вслед за ними и наука категорически отрицали саму возможность отсутствия этого – ключевого – барьера, разделяющего психику людей и других животных.

На протяжении веков этот редут казался неприступным в связи с отсутствием методов и, соответственно, объективных данных, способных доказать наличие языка и речи у представителей животного мира. Ситуация начала коренным образом меняться ближе к середине XX века, когда, во-первых, начались масштабные исследования специфических способов коммуникаций среди животных («язык пчел», расшифрованный нобелевским лауреатом Карлом Риттером фон Фришем, тому пример), а во-вторых, стали предприниматься попытки обучения животных «искусственным» языкам, позволяющим сформировать прямой вербальный контакт между человеком и другими животными.

«Искусственными» эти языки принято называть, потому что они были созданы специально для расширения коммуникативных возможностей людей с различными физическими или неврологическими дефектами. Это хорошо известный язык мимики и жестов, предназначенный для вербального общения людей, глухих от рождения или потерявших слух в раннем детстве, а также своеобразный «язык жетонов» – йёркиш, который используется для социализации детей с грубыми неврологическими проблемами. Йёркиш известен только узкому кругу дефектологов, поэтому есть необходимость в его кратком описании.

В классическом («человеческом») варианте используется магнитная доска и наборы металлических жетонов, на которых изображены лексиграммы, представляющие собой графические сим-

волы, т. е. символы, принципиально не похожие на предмет или действие, которые они обозначают. Каждый символ означает конкретное слово.

Необходимость обучения животных именно искусственным языкам обусловлена сугубо «технической» проблемой: у животных, даже таких наших ближайших родственников, как обезьяны, устройство и расположение хрящей и связок гортани не позволяет им освоить внятное произнесение слов человеческой речи. Максимум, которого смогли добиться исследователи, – 3–5 односложных слов.

В середине 60-х годов прошлого века начался уникальный проект, призванный сформировать возможность прямого вербального контакта между человеком и животными других видов. Первоначально в нем использовался жестовый язык глухих. Так как первые эксперименты осуществлялись в США, это был адаптированный для английского языка вариант – амслен. В дальнейшем, для большей объективности исследований, в проекте стал использоваться адаптированный специально для обезьян Эрнстом фон Глазерсфельдом йёркиш, который очень быстро был реализован в компьютерном варианте. Такой подход позволил избавиться от свойственного работе с амсленом человеческого фактора, так как обезьяны могли быть полностью изолированы от общения с людьми во время работы с текстами.

К сожалению, ограниченный объем статьи не позволяет остановиться на драматичной предьстории проекта. А история началась с того момента, когда лингвисты Алан и Беатрикс Гарднеры взяли на воспитание юную самочку шимпанзе Уошо. Принципиальной особенностью этого эксперимента стало жесткое условие: общение с приматом производилось исключительно на амслене. К концу исследования и, соответственно, к моменту кончины Уошо на 43-м году жизни шимпанзе свободно общалась с людьми, используя словарный запас, содержащий около 350 знаков амслена. Она вполне разумно отвечала на вопросы, выражала свое настроение, описывала происходящие события, шутила и даже язвничала. Ее жалоба Гарднерам на служителя: «Вчера грязный нигер Том не дал мне воды» вошла во многие учебники по психологии как образец ругательства (сегодня уже известно, что «грязный» самое распространенное ругательство у обезьян) и расовой нетерпимости.

Однако публикации супругов Гарднеров долгое время подвергались жесткой критике. Кроме очевидного нежелания признать крах еще одного надуманного барьера между психикой человека и других животных, критики высказывали и достаточно весомые аргументы, например:

– исследование проведено только на одном животном (для справки: далеко идущие выводы об особенностях высшей нервной деятельности приматов И.П. Павлов сформулировал на основе экспериментов с одним-единственным шимпанзе Рафаэлем, так как вторая шимпанзе – Роза – в опытах участвовать категорически отказывалась);

- это животное представляет собой пример уникальной гениальности в ряду обезьян;
- это животное только одного вида (*Pan troglodytes*) приматов;
- нет статистики по репрезентативной выборке;
- представлен результат дрессировки;
- ничего она не «говорит», а просто машет руками. А Гарднеры заинтересованы в сенсации и поэтому выдают это за «речь».

Во многом как ответ на эту критику следующий этап исследования в середине 1970-х годов был построен по другой схеме. Во-первых, расширился круг приматов, участвующих в экспериментах. Кроме нескольких шимпанзе (Лана, Люси, Сара, Ним Чимпски, Матата, Канзи, Панбаниша и др.) двух видов (*Pan troglodytes* и *Pan bonobo*), в проект вошли орангутаны (Чатек и Чуча) и гориллы (Коко и Майкл). Таким образом, вопрос формальной статистики был снят.

Во-вторых, наряду с амсленом, в проекте стали использовать йёркиш, включая компьютерный.

В-третьих, эксперименты стали проводиться в специально оборудованных в нескольких университетах США примат-центрах.

В-четвертых, в исследования включилась большая группа специалистов в области приматологии, нейролингвистики, нейрофизиологии, зоопсихологии и т. д. В частности, это супруги Дэвид и Энн Джеймс Примеки, Роджер Футс, Джанин Мёрфи, Франсин Паттерсон, Тимоти Гилл, Дуэйн Румбо и Сью Сэвидж-Румбо и мн. др.

Результаты не заставили себя долго ждать. Выяснилось, что обезьяны самопроизвольно усваивают грамматику английского языка: в своих предложениях они в начале ставят «кто делает», затем «что делает» и только потом «зачем, когда, где и т. д.». Оказалось, что они способны комбинировать слова для передачи информационного образа. Так, бонобо Канзи, впервые увидев лебедя, возбужденно сообщил: птица-вода, птица-вода. А образ, описывающий желаемый фрукт, читатель опознает без труда: яблоко-солнце.

Активно пользуясь новыми коммуникативными возможностями, приматы проявили способности ругаться, спорить, врать, жаловаться, шутить. Весьма симптоматична любимая шутка гориллы Коко: «Я птичка» (1,5 центнера живого веса)...

Словарный запас испытуемых колеблется от чуть больше 120 «слов» (самый бестолковый шимпанзе Ним Чимпски; впрочем, здесь виноват еще более бестолковый «исследователь» Герберт Террас) до 1200 четко верифицированных лексиграмм шимпанзе-бонобо Канзи), которыми он пользуется при общении. Еще больше поражает случайно выявившаяся способность обезьян свободно понимать на слух обращенную к ним речь («Не надо нам писать лексиграммы, мы и так вас прекрасно понимаем!»). Для того же лидера проекта – бонобо Канзи – доказана способность понимать на слух более 3000 слов.

Приходится признать, что эксперименты с «говорящими» обезьянами (а таких приматов сегодня более 100 в мире, включая Россию) более всего демонстрируют принципы и механизмы обучения человека иностранным языкам.

В целом, нельзя не признать правоту нобелевских лауреатов, которые в опросе, проведенном на стыке тысячелетий, на первое место в списке наиболее выдающихся открытий прошедших веков поставили не полеты в космос, не лазеры и даже не атомную бомбу, а «установление первого в истории вербального контакта между человеком и животными других видов».

Если добавить к сказанному уже упомянутые эксперименты Айрин Пепперберг с говорящими попугаями («проект Алекс») или расшифровку языка дельфинов, осуществляемую командой Дайаны Рейсс, становится очевидным, что владение языком сегодня перестало быть прерогативой *Homo sapiens*.

Заключение

Исследования последних десятилетий кардинально сужают круг особенностей, принципиально отличающих проявления сознания у человека и других животных. Пожалуй, с уверенностью можно указать лишь на такие компоненты культуры, как фиксация знаний на материальных носителях и связанная с этим передача информации через множество поколений. Это, с одной стороны, расширяет возможности исследования сознания, но одновременно повышает планку этических ограничений при экспериментах на животных, не являющихся человеком.

И последнее: 23 июня 2023 года в Нью-Йорке Кристофер Кох торжественно преподнес Дэвиду Чалмерсу ящик портвейна в знак признания своего поражения в пари, согласно которому он 25 лет назад настаивал, что к 2023 году мы будем точно знать субстрат и механизмы сознания...

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ, грант № 22-18-20075.

Литература

1. Ленин В.И. Материализм и эмпириокритицизм // Полное собрание сочинений. 5-е изд. 1968. Т. 18. С. 131.
2. Анохин П.К. Принципы системной организации функций. М. : Наука, 1973. С. 5–61.
3. <http://fcmconference.org/img/CambridgeDeclarationOnConsciousness.pdf>.
4. Зорина З.А., Полетаева И.И., Резникова Ж.И. Основы этологии и генетики поведения: учебник. 3-е изд. М. : Изд-во МГУ, 2013.
5. Зорина З.А., Смирнова А.А. О чем рассказали «говорящие» обезьяны: способны ли высшие животные оперировать символами? М. : Языки славянских культур, 2006.
6. Резникова Ж.И. Зоопсихология. Интеллект и язык животных и человека : учебник для вузов ; в 2 ч. М. : Юрайт, 2020.
7. Резникова Ж.И. Экология, этология, эволюция. Межвидовые отношения животных : учебник для вузов; в 2 ч. М. : Юрайт, 2020.

Анализ активности нейрон-астроцитарных сетей с применением динамического графа распространения кальциевого сигнала

А.М. Пахомов^{1,2*}, М.И. Кривонос¹, М.О. Савюк¹, Р.С. Ярков¹, М.В. Ведунова¹,
Е.В. Митрошина¹

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород,

* science_pam@mail.ru

Ионы кальция играют фундаментальную роль во множестве процессов, протекающих в головном мозге, в том числе в контроле работы синапсов и формировании памяти. Должным образом контролируемый гомеостаз кальциевой сигнализации поддерживает не только нормальную сигнальную трансдукцию, но также необходим для сохранения целостности нейронов и долговременного выживания всех клеток.

Анализ распространения кальциевого сигнала в нейрон-глиальных сетях может позволить получить сведения как о нейрональной активности, так и о кальциевой динамике в астроцитах, что позволит сформировать более полное понимание механизмов мозговой активности и взаимодействия между этими двумя типами клеток.

Одновременное наблюдение за электрической активностью нейронов и кальциевой активностью астроцитов может помочь раскрыть механизмы координации между этими клетками, а также помочь в исследованиях пластичности и адаптивных процессов в нервной системе. Это также может быть полезным для изучения нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера и болезнь Паркинсона, где астроциты и нейроны взаимно влияют друг на друга, и понимание их взаимодействия может способствовать развитию новых терапевтических подходов [9].

При проведении подобных исследований часто используется метод флуоресцентного кальциевого имиджинга, который не требует разрушения образца для анализа. Кроме того, он позволяет исследовать живые клетки в режиме реального времени *in vitro* и даже *in vivo* и получать информацию о динамике кальциевых сигналов в нейрон-астроцитарных сетях.

Астроциты – глиальные клетки, которые выполняют множество важных функций в головном мозге, включая поддержание гомеостаза, тонкую настройку синаптической активности и регуляцию кровотока. Хотя астроциты не обладают способностью к генерации активных электрических сигналов, они способны реагировать на различные стимулы и активно взаимодействуют с нейронами и другими клетками нервной системы с помощью генерации кальциевых волн.

Внутриклеточные изменения концентрации кальция могут быть вызваны различными факторами, такими как нейротрансмиттеры, химические стимулы (рис. 1). Повышение уровня кальция в

астроцитах может привести к активации различных кальций-зависимых процессов, таких как высвобождение глутаматных (например, глутамата или АТФ), которые затем могут влиять на соседние нейроны и глиальные клетки [7].

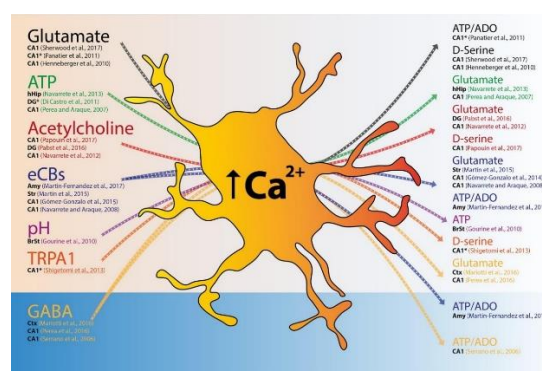


Рис. 1. Как возбуждающие, так и тормозящие сигналы вызывают глобальное или локальное повышение уровня Ca^{2+} в астроцитах и приводят к высвобождению глутаматного [7]

Кроме того, астроциты могут реагировать на изменения внутриклеточного кальция и модулировать свою активность в ответ на нейрональную активность. Это взаимодействие между астроцитами и нейронами позволяет им совместно работать для поддержания гомеостаза и оптимальной функции нервной системы.

Таким образом, хотя астроциты не являются возбудимыми клетками в традиционном смысле, динамика кальция в них отражает их функции и активность, что позволяет им активно участвовать в нейроглиальной связи и модуляции нейрональной активности.

Электрическая активность нейронов также ассоциирована с изменениями концентрации ионов Ca^{2+} . Потенциал-чувствительные кальциевые каналы в окончаниях аксона открываются в ответ на приход потенциала действия (ПД) (рис. 2), что запускает экзоцитоз нейромедиаторов, передающих возбуждение или торможение на соседний нейрон в синапсах [4].

В дендритах ионы Ca^{2+} обеспечивают интересное свойство нервных клеток, лежащее в основе таких фундаментальных свойств нервной системы, как память и обучение, – долговременную потенциацию.

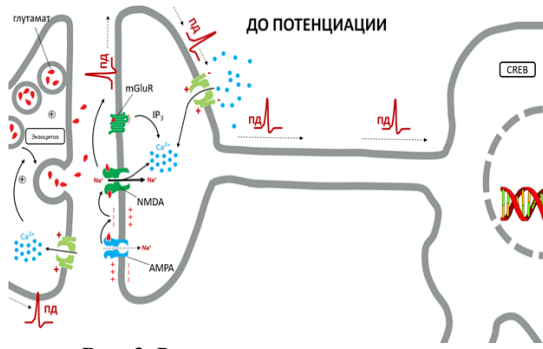


Рис. 2. Роль ионов кальция в передаче нервного импульса [4]

Роль кальция в работе нервных клеток еще более важна, чем считалось до недавнего времени, – Gidon с коллегами [1] обнаружили, что отдельные клетки коры головного мозга используют для активации не только ионы натрия, но и ионы кальция. Эта комбинация положительно заряженных ионов вызывает неизвестные ранее волны напряжения, называемые кальций-опосредованными дендритными потенциалами действия, или dCaAPs. Это открывает новые возможности для логической обработки сигнала: либо это будет сообщение И (сообщение передается дальше, если срабатывают x и y), либо сообщение ИЛИ (сообщение передается дальше, если срабатывает или x , или y).

Описание процесса распространения кальциевого сигнала с помощью инструментов теории графов

Связанные сети являются фундаментальной структурой нейробиологии. Понимание механизмов работы этих сетей поможет нам раскрыть нейронные механизмы вычислений.

С математической точки зрения эти сети представляют собой графы – структуры, содержащие связанные объекты. В нейробиологии объектами могут быть области мозга, например, данные фМРТ или отдельные нейроны, например, визуализация кальция с помощью флуоресцентной микроскопии. Теория графов может предоставить нейробиологам большой набор инструментов для исследования нейрон-глиальных сетей. Теория графов уже применялась при обработке данных фМРТ, но в последнее время стала применяться и в масштабах отдельных клеток, например, при функциональной визуализации кальция [6].

В теории сетей многомерные сети (multidimensional networks), особый тип многослойных сетей, представляют собой сети с несколькими видами отношений. Распространение кальциевого сигнала – это процесс, развивающийся в пространстве и времени, таким образом, один вид отношений – пространственные (от клетки к клетке), а другой – временные. Динамический граф представляет собой многомерную сеть, отражающую изменение рисунка кальциевой активности культуры клеток во времени.

Любые сети можно описать через два их основных компонента – вершины и ребра, а также

через взаимоотношения между ними. В контексте мозговых сетей вершина – это заранее определенная зона интереса, а ребро – степень связности между вершинами. После вычисления сети можно измерить ряд стандартных параметров, чтобы понять как глобальные, так и локальные свойства взаимодействий между различными зонами мозга. В широком смысле эти параметры характеризуют функциональную интеграцию, функциональную сегрегацию, центральность и степень компактности.

Построение динамического графа

Алгоритм построения динамического графа основан на анализе наложения событий и был реализован в среде MATLAB [5].

Для каждого кадра можно построить ориентированный граф:

$$G_t = \langle V_t, E_t \rangle, t = \overline{1, T}. \quad (1)$$

Ребро проведем между двумя вершинами, если одновременно выполняются следующие условия.

1. Пересечение отрезков времени, соответствующих событиям кальциевой активности для двух соседних клеток, выделенным каким-либо алгоритмом, например, в [10] (рис. 3).

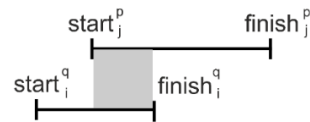


Рис. 3. Анализ наложения двух сравниваемых событий

$$C(ev_p^i, ev_q^j) = [start_p^i < start_q^j < finish_q^j < finish_p^i]. \quad (2)$$

2. Множество вершин ориентированного динамического графа:

$$V_t = \{v_i^t, : i \text{ клетка в момент } t, i = \overline{1, n}\}. \quad (3)$$

Множество ребер для одного кадра:

$$E_t = \left\{ \begin{array}{l} e_{ij} = (v_i, v_j, <): v_i, v_j \in V_t, ev_p^i \in Ev^i, \\ ev_q^j \in Ev^j, C(ev_p^i, ev_q^j) \wedge (a_{ij} = 1) \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Их совокупность представляет собой ориентированный динамический граф для всего видеоряда:

$$G_D = \langle V_D, E_D \rangle. \quad (5)$$

Множество вершин динамического графа является объединением вершин:

$$V_D = \bigcup_t V_t. \quad (6)$$

Множество ребер динамического графа является объединением ребер:

$$E_D = \bigcup_t E_t. \quad (7)$$

Естественным предположением является то, что сигнал распространяется из той области, где он появляется раньше. На рис. 4 кальциевое событие в области 1 начинается раньше, чем в областях 2 и 3, а событие в области 4 отстает от события в области 3.

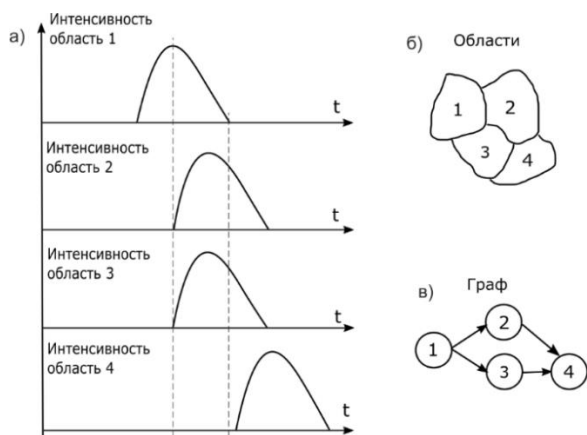


Рис. 4. Анализ наложения двух сравниваемых событий. Сигнал интенсивности (а), взаимное расположение областей (б) и полученный граф (в)

Таким образом, результирующий направленный граф распространения сигнала показан на рис. 2, в – сигнал распространяется от клетки 1 к клеткам 2 и 3 и от клетки 3 к клетке 4.

Метрики динамического графа

Измерение количества одновременно происходящих событий передачи позволяет лучше оценить активность культур. В динамическом графе это количество ребер между всеми соседними вершинами для кадра видео, на котором зарегистрировано их максимальное количество:

$$\max(|E_t|), E_t \in E_D. \quad (8)$$

Среднее число периодически возникающих связей на клетку позволяет оценить активность и равномерность работы клеток. Данный показатель не учитывает те связи, которые на всем видео появляются только один раз:

$$\frac{\sum_{v_i \in V_D} (deg^-(v_i) + deg^+(v_i))}{n}. \quad (9)$$

Число ребер динамического графа. Суммарное число ребер по всем кадрам:

$$N_{EC} = |E_C|. \quad (10)$$

Эта метрика учитывает ребро на каждом кадре за все время наложения сравниваемых событий.

Для анализа достоверности различий между группами был использован критерий Манна-Уитни-Уилкоксона. Разница между группами считалась достоверной, если значение p-value было меньше 0,05. Для множественных сравнений величины p-value скорректированы при помощи метода Хольма-Бонферрони.

Схема эксперимента

Возможности метода проиллюстрированы анализом нейрональных и астроцитарных культур – интактных и подвергнутых физиологическому старению. Клетки нейрональных культур получали из гиппокампа эмбрионального мозга мыши (18-й день гестации) и культивировали на покровных стеклах. Моноастроцитарные культуры получали из коры больших полушарий мышат

P1-P6 линии C57Bl6. Регистрацию активности нейрональных культур и молодых культур астроцитов проводили на 14 день культивирования. Для моделирования физиологического старения первичные астроцитарные культуры культивировались в течение 143–150 дней.

Результаты и обсуждение

В работе авторов [5] было показано, что культуры клеток гиппокампа, содержащие как нейроны, так и астроциты, в отличие от моноастроцитарных культур характеризуются высокой синхронностью и равномерностью передач (рис. 5, а, б). Для культур астроцитов, подвергнутых физиологическому старению, был проведен аналогичный анализ. Динамика числа передач и карта, показывающая значительное снижение передач в культуре, приведены на рис. 5, в, е. Астроцитарные культуры, подвергшиеся моделированию физиологического старения, в среднем имеют меньшую активность по сравнению с интактными астроцитарными культурами.

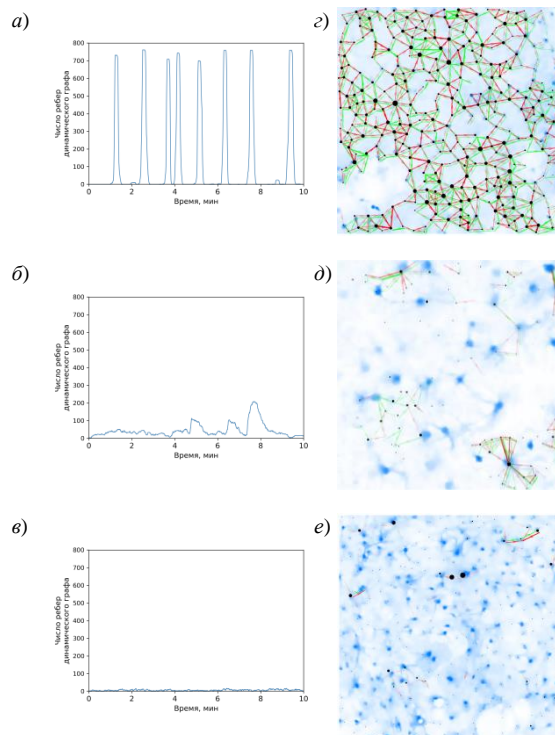


Рис. 5. Динамика числа передач: а – интактной нейрональной культуры, б – интактной астроцитарной культуры, в – астроцитарной культуры, подвергшейся физиологическому старению. Карта, показывающая равномерность передач: z – в интактной нейрональной культуре, d – в интактной астроцитарной культуре, e – в астроцитарной культуре, подвергшейся физиологическому старению [5]

На рис. 6 приведены диаграммы размаха среднего числа периодических связей, числа ребер динамического графа, максимального числа ребер в кадре в логарифмическом масштабе.

По параметру числа ребер динамического графа, максимального числа ребер в кадре выяв-

лено достоверное отличие нейрональных и моно-astroцитарных культур, что соответствует нашим теоретическим предположениям. По параметру среднего числа периодических связей выявлено достоверное отличие всех групп.

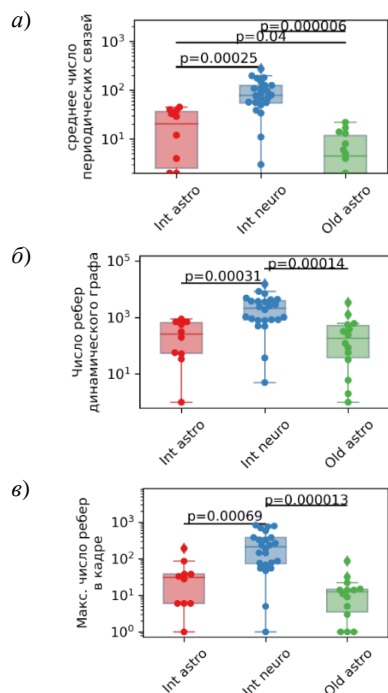


Рис. 6. Характеристики культур клеток гиппокампа (Int astro – интактной астроцитарной, Int neuro – интактной нейрональной и Old astro – астроцитарной, подвергшейся физиологическому старению): а – среднее число периодических связей, б – число ребер динамического графа, в – максимальное число ребер в кадре

Таким образом, построение динамического графа распространения сигнала в нейрон-astroцитарных сетях и расчет связанных с ним метрик позволяет получить данные, характеризующие кальциевую динамику в нейрон-глиальных и astroцитарных сетях в различных физиологических состояниях. Показано, что активность и синхронность кальциевых событий в нейрональных культурах достоверно выше, чем в моноastroцитарных. Также продемонстрировано, что при старении кальциевая активность и ее связность в astroцитарных культурах достоверно снижается. Разработанные алгоритмы позволят в дальнейшем выявить закономерности и нарушения в передаче

кальциевых сигналов в нейрон-astroцитарных сетях при различных физиологических состояниях и патологических процессах.

Работа выполнена в рамках проекта НЦМУ «Центр фотоники», при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2022-293.

Литература

1. Gidon A., Zolnik T.A., Fidzinski P., Bolduan F., Papoutsi A., Poirazi P., Holtkamp M., Vida I., Larkum M.E. Dendritic action potentials and computation in human layer 2/3 cortical neurons // *Science*. 2020. Jan. 3;367(6473). P. 83–87.
2. Humphries M.D., Gurney K. Network ‘Small-World-Ness’: A Quantitative Method for Determining Canonical Network Equivalence // *PLoS ONE*. 2008. 3(4): e0002051.
3. Humphries M.D., Gurney K., Prescott T.J. The brainstem reticular formation is a small-world, not scale-free, network // *Proc. Biol. Sci.* 2006. Feb. 22;273(1585):503–11.
4. Berridge M.J., Lipp P., Bootman M.D. The versatility and universality of calcium signaling // *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 2000. 1, 11–21.
5. Mitroshina E.V., Pakhomov A.M., Krivonosov M.I., Yarkov R.S., Gavrish M.S., Shkirin A.V., Ivanchenko M.V., Vedunova M.V. Novel Algorithm of Network Calcium Dynamics Analysis for Studying the Role of Astrocytes in Neuronal Activity in Alzheimer’s Disease Models // *Int. J. Mol. Sci.* 2022, 23, 15928.
6. Nelson C.J., Bonner S. Neuronal Graphs: A Graph Theory Primer for Microscopic, Functional Networks of Neurons Recorded by Calcium Imaging // *Front. Neural Circuits*. 2021. 15:662882.
7. Guerra-Gomes S., Sousa N., Pinto L., Oliveira J.F. Functional Roles of Astrocyte Calcium Elevations: From Synapses to Behavior // *Frontiers in Cellular Neuroscience*. 2018. 11.
8. Resendez S., Stuber G. In vivo Calcium Imaging to Illuminate Neurocircuit Activity Dynamics Underlying Naturalistic Behavior // *Neuropsychopharmacol.* 2015. 40. P. 238–239.
9. Han X., Zhang T., Liu H., Mi Y., Gou X. Astrocyte Senescence and Alzheimer’s Disease: A Review // *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2020. № 12. P. 1–13.
10. Kustikova V., Krivonosov M.I., Pimashkin A., et al. Computer vision software for calcium signaling in astrocytes // *International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts*. 2018. P. 168–179.

Простая искусственная нейронная сеть распознает состояние «медленный сон» у крыс в свободном поведении

Д.А. Перевознюк^{1,2}, К.С. Сергеев³, А.В. Слепнев³, Н.И. Семенова³, Е. Ситникова¹

¹ Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва; perevoznukd@mail.ru

² Сколковский институт науки и технологий, Москва

³ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

Электроэнцефалография (ЭЭГ) – это метод исследования электрической активности мозга, который используется для изучения функций головного мозга. Данные ЭЭГ используются для выявления аномалий нервной системы, а также для изучения особенностей нормальной физиологической активности, например, состояния сна. Выделяют две основные фазы сна: медленный и быстрый сон. Во время медленного сна снижается мышечный тонус, прекращается передача информации от органов чувств. В состоянии быстрого сна мышечный тонус минимален, а активность головного мозга сходна с таковой во время бодрствования (по форме ЭЭГ).

Изучение медленного сна с использованием ЭЭГ является важным инструментом для диагностики нарушений сна. Во время медленного сна, помимо снижения мышечного тонуса, замедляется сердечный ритм и формируется состояние физического покоя. Это необходимо для восстановления энергетических ресурсов организма [1, 2]. Данная функция медленного сна – восстановительная – представляет интерес для медицины и реабилитации [1].

Известно, что неврологические заболевания (эпилепсия, нейродегенеративные болезни и т. д.) ухудшают качество сна и влияют на него структуру [1, 3–5]. В частности, при абсанс-эпилепсии, которая является наиболее распространенным типом эпилепсии детского и юношеского возраста, нарушена система регуляции медленного сна (*NREM sleep-promoting system*) [5–6]. У крыс WAG/Rij с генетической предрасположенностью к данному заболеванию (эти животные служат надежной моделью абсанс-эпилепсии человека [7]) выявлены аналогичные структуры сна [8]. По нашим данным, у взрослых крыс с интенсивной пиковолновой эпилепсией медленный сон более фрагментирован, чем у особей без эпилепсии, но его общая продолжительность оставалась неизменной [9]. Это стало возможным благодаря использованию автоматической системы определения медленного сна на околосуточных записях ЭЭГ, созданной нами на базе непрерывного вейвлетного преобразования [9]. Этот алгоритм требовал значительных ресурсов и вычислительных мощностей.

Цель настоящей междисциплинарной работы – ускорить и облегчить автоматическую систему медленного сна. Для этого были использованы современные технологии искусственного интел-

лекта и создана простая искусственная нейронная сеть (ИНС), показавшая высокую эффективность в задаче с выделением медленного сна на 3-канальных записях ЭЭГ у крыс в свободном поведении. Сигнал был получен посредством эпидуральных электродов, вживленных над областями коры больших полушарий, где типичные маркеры медленного сна (сонные веретена и дельта-волны, см. ниже).

Метод регистрации ЭЭГ в свободном поведении с использованием вживленных электродов

Эпидуральные электроды – поверхностные электроды, расположенные над поверхностью твердой мозговой оболочки (*dura mater*), которые крепятся к кости черепа с помощью винтов из нержавеющей стали (длина 2,0 мм, диаметр головки 2,0 мм, диаметр резьбы 0.8 мм). Разъемы были изготовлены в лаборатории ИВНД и НФ РАН и содержали по 4 электрода: 3 активных и 1 референтный.

Хирургическую операцию по вживлению эпидуральных электродов проводили под общим ингаляционным наркозом (изуфлоран). После исчезновения чувствительности с поверхности черепа удаляли шерсть, место хирургического вмешательства обрабатывали спиртовым 5% раствором йода. Голову крысы закрепляли в стереотаксическом аппарате *Kopf*. Дополнительно использовали местную инфильтрационную анестезию мягких тканей (2% раствор лидокаина). Проводили скальпирование и удаление надкостницы. На кости черепа формировали трепанационные отверстия в области лобной коры справа и слева (AP 2, L ±2), затылочной коры (AP –5; L 4) и над поверхностью мозжечка для размещения референтного электрода. Все координаты указаны в миллиметрах относительно брегмы.

Крепили свободные концы электродов к разьему и помещали в пластиковую трубку диаметром 1 см с внешней резьбой (коннектор для соединения с кабелем). Фиксация конструкции на кости черепа – с помощью метилметакрилатного мономера. Послеоперационный период адаптации составлял 6–7 суток.

Запись ЭЭГ проводили у двух крыс одновременно в условиях свободного поведения, в плексигласовых клетках (25 × 60 × 60 см), расположенных в экранированной камере (рис. 1).

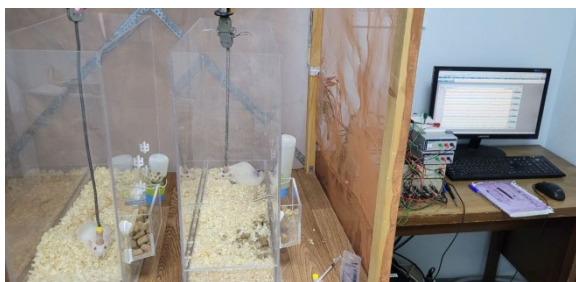
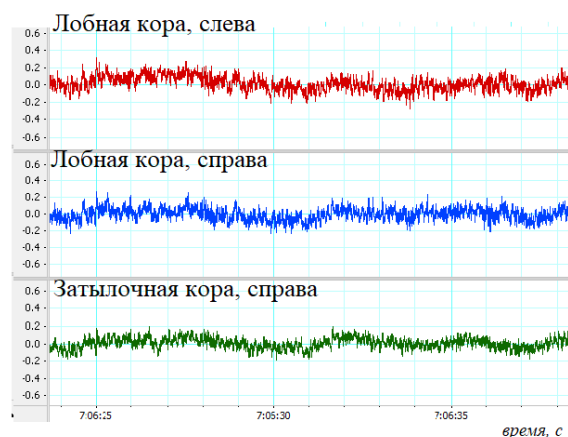
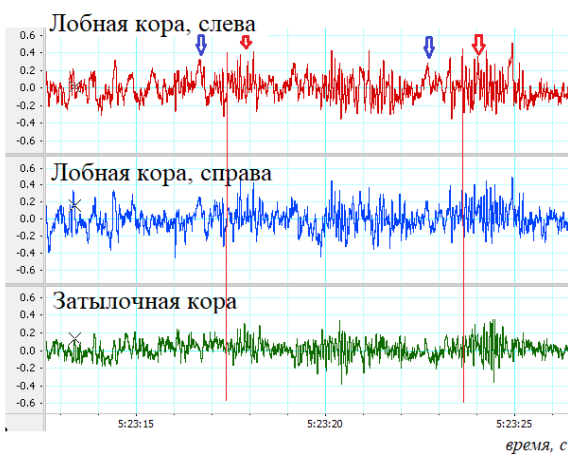


Рис. 1. Процесс регистрации 3-канальных ЭЭГ у двух крыс в свободном поведении с использованием 8-канального усилителя PowerLab 8/35 (ADInstruments)

Входной сигнал подавался на многоканальный усилитель (PowerLab 8/35, ADInstruments) через поворотный разъем, подвергался полосовой фильтрации в диапазоне 0,5–200 Гц и оцифровывался с 400/с/канал. Дополнительно регистрировали поведение крыс в течение записи с помощью видеокамеры Genius eFace 1325R.



А



Б

Рис. 2. Пример 3-канальной записи ЭЭГ у крысы WAG/Rij в свободном поведении. Амплитуда сигнала в милливольтгах. А – состояние бодрствования, Б – состояние медленного сна; сонные веретена обозначены более длинными стрелками и вертикальными линиями. Дельта-волны обозначены короткими стрелками

Маркерами медленного сна на ЭЭГ являлись медленные волны и сонные веретена (рис. 2). Медленные волны – это высокоамплитудные колебания на ЭЭГ с частотой 0,5–4 Гц. Сонные веретена – это колебания амплитуды ЭЭГ с частотой 12–14 Гц, длящиеся от 0,5 с и имеющие веретенообразную форму.

тена – это колебания амплитуды ЭЭГ с частотой 12–14 Гц, длящиеся от 0,5 с и имеющие веретенообразную форму.

Настройка искусственной нейронной сети

Подготовка данных (preprocessing)

Это подготовительный этап. Сигнал подвергался фильтрации в полосе частот 0,5–100 Гц. Далее для удаления выбросов амплитуды (артефакты движения, жевания и т. п.) значения выше 200 мВ приравнивались к 200 мВ, ниже –200 мВ приравнивались к –200 мВ. Использовали скрипт на языке Python, библиотеки NumPy и MNE.

Запись разбивали на 10-секундные интервалы. В каждом интервале вычисляли среднее значение амплитуды (μ) и стандартное отклонение значений амплитуды (σ). Значения μ и σ были использованы как входные данные для ИНС.

Стандартное отклонение вычисляли по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (xi - x)^2},$$

где n – размер выборки, x – среднее арифметическое выборки, xi – i -й элемент выборки.

Обучение ИНС

Использовали пакет API Keras и язык программирования Python. Сеть обучали с помощью оптимизационного алгоритма Adam и бинарной кросс-энтропийной функции потерь:

$$l = -(y(\log(p) + (1 - y) \log(1 - p))),$$

где y – значение бинарного индикатора, p – предсказанная вероятность отношения объекта к данному классу и l – значение перекрестной энтропии.

Для обучения ИНС использовали набор данных, в котором интервалы сна были заранее размечены экспертом. Сеть тренировали на интервалах длительностью от 1000 до 2000 с, в каждый из которых попадали участки сна и бодрствования. Использовали 3-канальные данные ЭЭГ, зарегистрированные у 11 взрослых крыс WAG/Rij (возраст 9 месяцев).

Входными данными для ИНС были значения, полученные от двух или трех каналов ЭЭГ (см. рис. 2). При использовании данных от 2 каналов ИНС состояла из четырех входных и одного выходного нейрона. При использовании данных 3 каналов ИНС состояла из шести входных и одного выходного нейрона. Каждый входной нейрон принимал на вход либо среднее значение амплитуды сигнала (μ), либо стандартное отклонение амплитуды сигнала (σ) в данном интервале. Эти значения были вычислены на предыдущем этапе. Выходной нейрон использовал функцию активации класса сигмоид:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}.$$

Данная функция принимала значения от 0 до 1, и эти значения были приведены к бинарному

виду: значения $\geq 0,5$ были приравнены к 1; значения $< 0,5$ были приравнены к 0. Значение 1 на выходе ИНС соответствовало состоянию сна. Значение 0 – состоянию бодрствования.

Таким образом, всю сеть можно представить как функцию вида

$$y = f(\mu_1 * W_1 + \sigma_1 * W_1 + \mu_2 * W_2 + \sigma_2 * W_2 + b),$$

где f – функция активации, W – весовой коэффициент.

Результатом работы ИНС была бинарная разметка, в которой каждому 10-секундному интервалу соответствовало значение 0 (бодрствование) или 1 (медленный сон).

Постобработка результатов работы ИНС

Состояние медленного сна обычно длится дольше 10 с, поэтому идущие подряд эпизоды сна, распознанные ИНС, объединяли в один интервал. Минимальная длительность интервала сна составляла 30 с. Если интервал сна начинался менее чем через 120 с после окончания предыдущего, то такие интервалы объединялись в один. Постобработку производили с использованием скрипта на языке Python и библиотеки NumPy.

Пороговые значения длительности сна и интервалов между соседними эпизодами сна были отобраны эмпирически, с ориентировкой на значения чувствительности и специфичности.

Чувствительность вычислялась как отношение длительности эпох, действительно относящихся ко сну, к длительности эпох, размеченных ИНС как сон.

Специфичность же вычислялась как отношение длительности эпох, действительно относящихся к бодрствованию, к длительности эпох, размеченных ИНС как бодрствование. Описанные выше пороговые значения позволяли добиться чувствительности и специфичности не менее 0,9.

Физиологическая интерпретация работы

Работа нейронных сетей головного мозга вызывает большой интерес у нейрофизиологов и разработчиков искусственного интеллекта. В норме нейронные сети осуществляют обработку ин-

формации и обеспечивают реализацию высших нервных функций.

Результаты можно интерпретировать с позиции висцеральной теории сна И.Н. Пигарева [10]. Используемая нами простая ИНС может быть аналогом «вентильного устройства», которое регулирует потоки информации от органов чувств на уровне таламуса. В состоянии сна (бинарный результат ИНС = 1) таламус блокирует поток информации к коре больших полушарий, в состоянии бодрствования (бинарный результат ИНС = 0) – пропускает.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 23-25-00166).

Литература

1. *Полуэктов М.Г.* Загадки Сна. От Бессонницы до летаргии // Альпина нон-фикшн: М., 2019. 292 с.
2. Месяц С.В. Аристотелевская теория сна глазами современной науки // Историко-философский ежегодник. 2021. № 36. С. 142–161.
3. *Полуэктов М.Г.* Нарушения сна в практике невролога // Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2012. Т. 4. С. 18–24.
4. *Центерадзе С.Л., Полуэктов М.Г.* Расстройства сна при заболеваниях нервной системы // Медицинский совет. 2018. № 7. С. 46–50.
5. *Halász, P.; Bódizs, R.; Ujma, P.P.; Fabó, D.; Szűcs, A.* Strong Relationship between NREM Sleep, Epilepsy and Plastic Functions — A Conceptual Review on the Neurophysiology Background // *Epilepsy Res.* 2019. V. 150. P. 95–105, doi:10.1016/j.eplepsyres.2018.11.008.
6. *Halász P, Szucs A.* Sleep and epilepsy link by plasticity // *Front Neurol.* 2020. V. 11. P. 911. doi: 10.3389/fneur.2020.00911.
7. *Coenen A.M.L., van Luijckelaar E.L.J.M.* Genetic animal models for absence epilepsy: a review of the WAG/Rij strain of rats // *Behav Genet.* 2003. V. 33. P. 635–655. doi: 10.1023/A:1026179013847.
8. *Sitnikova E.* Sleep Disturbances in rats with genetic pre-disposition to spike-wave epilepsy (WAG/Rij) // *Front. Neurol.* 2021. V. 12, P. 1945, doi:10.3389/fneur.2021.766566.
9. *Runnova A., Zhuravlev M., Kiselev A., Ukolov R., Smirnov K., Karavaev A., Sitnikova E.* Automatic Wavelet-Based Assessment of Behavioral Sleep Using Multichannel Electroencephalography in Rats // *Sleep Breath.* 2021. V. 25. P. 2251–2258; doi:10.1007/s11325-021-02357-5.
10. *Пигарев И.Н.* Висцеральная теория сна // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2013. Т. 63, № 1. С. 86–104.

Построение оптимальной обратной связи для моделирования вертикальных миграций зоопланктона с учетом сезонных изменений

Д.А. Перов, О.А. Кузенков

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Аннотация

В данном исследовании используется новый подход к изучению суточной вертикальной миграции зоопланктона с учетом сезонных изменений. Предлагаемый подход основан на максимизации функции приспособленности. Строится оптимальная обратная связь между движениями зоопланктона и окружающей средой с помощью нейронной сети. Эта сеть обучается на наборе данных, охватывающих несколько сезонов, с целью максимизации средней функции приспособленности. В качестве метода обучения используется алгоритм «Выживание наиболее приспособленных» (SoFA). Обученная сеть генерирует стратегии миграции в различных сезонах. Результаты моделирования подтверждаются натурными наблюдениями. Построенная обратная связь представляет эффективный инструмент для исследования суточной вертикальной миграции зоопланктона с учетом сезонных изменений.

Введение

Обратная связь играет существенную роль в формировании поведения организмов в изменяющихся условиях окружающей среды [1]. Такая связь обеспечивает наибольшую приспособленность организма, что соответствует идее Дарвина о выживании наиболее приспособленных. В данном исследовании используется новый подход к моделированию поведения живых существ на основе обратной связи. Он основан на максимизации функции приспособленности. При моделировании поведения живых существ необходимо выразить их функцию приспособленности, отражающую конкурентные преимущества особей, а затем подобрать настройки обратной связи, обеспечивающей максимум этой функции.

Этот подход здесь применяется для построения оптимальной обратной связи при моделировании суточных вертикальных миграций зоопланктона [2]. Они заключаются в повторяющихся перемещениях зоопланктона в течение дня и играют важную роль в динамике органического вещества океана [3]. Такое поведение может изменяться в зависимости от сезона [4–7], что затрудняет его моделирование.

Периодический характер вертикальных миграций зоопланктона делает их удобным объектом изучения и моделирования адаптивного поведения живых организмов с использованием нейронных сетей. Анализируя паттерны и характеристики периодического движения зоопланктона, нейрон-

ные сети могут прогнозировать поведенческие реакции на окружающие факторы, максимизируя функцию приспособленности [7, 8]. Одним из подходов к обучению нейронных сетей являются эволюционные алгоритмы [7, 9], которые моделируют естественный процесс эволюции. В природе биологические виды эволюционируют посредством отбора, размножения и мутагенеза, в результате чего формируются наиболее приспособленные особи. При использовании эволюционных алгоритмов для обучения нейронных сетей происходят аналогичные процессы. Таким образом, применение эволюционных алгоритмов представляется наиболее естественным для моделирования поведения как результата биологической эволюции.

Основная цель этого исследования заключается в построении оптимальной обратной связи, отражающей сезонные изменения в суточных вертикальных миграциях. Для определения оптимальных настроек обратной связи используется нейронная сеть и эволюционный алгоритм «Выживание наиболее приспособленных» (SoFA).

Постановка задачи

В данном исследовании были использованы результаты натурных наблюдений поведения зоопланктона в заливе Саанич, расположенном в провинции Британская Колумбия (Канада), опубликованные в работах [10, 11]. Наблюдения были проведены в разные месяцы, включая апрель, июнь, сентябрь и декабрь. Также были использованы различные подходы к моделированию вертикальной миграции зоопланктона [4–7].

Одним из ключевых факторов, влияющих на вертикальную миграцию, является распределение пищи (F). Следующим важным фактором являются потери от хищничества. Зоопланктон не воспринимает эти потери напрямую, однако они непосредственно связаны с интенсивностью света в течение дня (P_t) и освещенностью по глубине (P_x), которые влияют на видимость зоопланктона для хищников. Из данных натурных наблюдений видно, что вертикальная миграция зоопланктона вверх начинается при закате солнца, а миграция вниз происходит незадолго до восхода солнца. Кроме того, на поведение зоопланктона влияет фактор смертности (D) из-за высокой температуры в приповерхностных слоях воды и наличия слоя сероводорода на глубине.

На основе наблюдений можно классифицировать факторы, влияющие на суточную сезонную

миграцию зоопланктона, на две группы. Первая группа включает факторы, которые несущественно изменяются в течение сезона. К ним относятся распределение пищи F , смертность из-за высокой температуры в приповерхностных слоях воды и наличия слоя сероводорода на глубине D , освещенность по глубине P_x . Вторая группа включает факторы, которые существенно меняются в течение сезона. Таким фактором является интенсивность света в течение дня P_t .

Будем рассматривать K сезонов, при этом k – номер сезона, $k = 1, \dots, K$. Пусть x_k – вертикальная координата положения зоопланктона в k -м сезоне, а t – время суток, изменяющееся от 0 до 24. В этом случае факторы, влияющие на вертикальную миграцию в k -м сезоне, могут быть аппроксимированы следующим образом:

$$F(x_k) = 0,5(\tanh(\xi_1(x_k - c_1)) + 1), \quad (1)$$

$$P_x(x_k) = \tanh(\xi_2(x_k - c_2)) + 1, \quad (2)$$

$$P_{tk}(t) = \cos(2\pi(\frac{t-t_{rk}}{t_{sk}-t_{rk}} + 0,5)) + 2, \quad (3)$$

$$P_k(x_k, t) = 0,5P_x(x_k)P_{tk}(t), \quad (4)$$

$$D(x_k) = 0,5(\xi_3\eta_1^{x_k-c_3} + \xi_4\eta_2^{-(x_k-c_4)}). \quad (5)$$

Здесь c_1, c_2, c_3, c_4 (соответствующие глубины распределения факторов), t_{rk}, t_{sk} (время начала нисходящей миграции и время захода солнца, которое ассоциируется с началом восходящей миграции), $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ и η_1, η_2 – некоторые параметры. Функция $F(x)$ соответствует распределению фитопланктона, а $P_{tk}(t)$ – выражение для интенсивности света в течение дня в k -м сезоне [12]. Параметризация смертности $D(x)$ является суммой двух функций, которые используются в работе [5].

Пусть $v_k = x_k(t)$ представляет собой наследственную стратегию поведения зоопланктона в k -м сезоне. Это непрерывная и дифференцируемая функция на интервале $[0, 24]$, удовлетворяющая условию $x_k(0) = x_k(24)$. Введенная стратегия позволяет рассчитать энергетические затраты на осуществление вертикальных перемещений зоопланктона, которые прямо пропорциональны квадрату его скорости $E(x_k') = \xi_5(\dot{x}_k(t))^2$. Функция приспособленности стратегии v_k определяется как средняя удельная скорость размножения [5, 6]. В долгосрочной перспективе выживает организм, который реализует стратегию с наибольшим значением функции приспособленности. Она напрямую зависит от среднего энергетического выигрыша за 24-часовой период на одного индивида. Получение этой энергии определяется приемом пищи и потерями из-за хищничества, неблагоприятных условий и движений:

$$J_k(v_k) = \int_0^{24} \left(\alpha F(x_k) - \beta P_k(x_k, t) - \gamma D(x_k) - \delta E(x_k') \right) dt. \quad (6)$$

Здесь $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – весовые коэффициенты, которые определяют относительный вклад соответствующих факторов.

В простейшем случае мы могли бы найти стратегию v_k , которая максимизирует заданную функцию приспособленности J_k отдельно для каждого сезона методами вариационного исчисления или

оптимального управления. Однако более перспективным и естественным подходом является построение обратной связи между зоопланктоном и окружающей его средой. Эта обратная связь может быть использована для моделирования стратегий миграции, адаптированных к разным сезонам. В природе не происходит эволюционный отбор для каждого изменения в условиях среды обитания. Вместо этого происходит постепенная настройка механизмов обратной связи, обеспечивающих наилучшую адаптацию, характеризующую усредненным значением функции приспособленности в диапазоне изменяющихся условий. Другими словами, наша задача состоит в построении обратной связи $\sigma(F, P_k, D)$ между состоянием окружающей среды и оптимальной скоростью передвижения зоопланктона в разных сезонах. Эта обратная связь генерирует оптимальные стратегии миграции $v_k(\sigma(F, P_k, D))$, которые максимизируют следующую усредненную по K сезонам функцию приспособленности:

$$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K J_k(v_k(\sigma(F, P_k, D))). \quad (7)$$

Перед разработкой обратной связи перейдем к дискретной аппроксимации стратегии перемещения зоопланктона v_k . Для этого поделим сутки на n равных интервалов длиной $h = 24/n$, начиная с $t_0 = 0$, тогда последующее начало каждого временного интервала определяется как $t_i = t_0 + ih$. Предполагается, что глубина погружения зоопланктона меняется линейно на каждом интервале. Тогда стратегия движения зоопланктона v_k определяется его положениями на каждом временном интервале $x_{ki} = x_k(t_i)$, или начальным положением x_{k0} и смещениями $\Delta x_{ki} = x_{ki} - x_{ki-1}$. Мы можем представить смещения как $\Delta x_{ki} = v \sigma_{ki}$, где v – фиксированная константа, а σ_{ki} может принимать одно из трех значений: $-1, 0$ или 1 . В таком случае поведенческие стратегии определяются начальными положениями x_{k0} и наборами коэффициентов σ_{ki} , $k = 1, \dots, K$, $i = 1, \dots, n$, а функция приспособленности для i -го сезона принимает следующий вид: $J_k(v_k(x_{k0}, \sigma_{k1}, \dots, \sigma_{kn}))$. В таком случае, нам нужно найти функцию σ , которая устанавливает зависимость смещений σ_{ki} от значений окружающих факторов $F(x_{ki-1}), P_k(x_{ki-1}, t_{i-1}), \Delta P_k(x_{ki-1}, t_{i-1}) \equiv P_k(x_{ki-2}, t_{i-2}) - P_k(x_{ki-1}, t_{i-1}), D(x_{ki-1})$:

$$\sigma_{ki} = \sigma \left(F(x_{ki-1}), P_k(x_{ki-1}, t_{i-1}), \Delta P_k(x_{ki-1}, t_{i-1}), D(x_{ki-1}) \right), \quad (8)$$

с целью максимизации следующего функционала:

$$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K J_k(v_k(x_{k0}, \sigma_{k1}, \dots, \sigma_{kn})). \quad (9)$$

Построение оптимальной обратной связи

Для поиска зависимости σ мы используем четырехслойную полносвязную нейронную сеть, показанную на рис. 1. Её архитектура была выбрана на основе численных экспериментов и предыдущих исследований [7]. Первый входной слой состоит из четырех нейронов, в то время как второй и третий скрытые слои содержат 6 и 12 нейронов соответственно. Четвертый слой со-

стоит из 3 нейронов. Вес w_p p -й связи, который усиливает сигнал, проходящий через нее, ограничен условием $|w_p| < w_{max}$, а b_j представляет биас, соответствующий j -му нейрону второго, третьего и четвертого слоя, с условием $|b_j| < b_{max}$. Функция активации для каждого нейрона второго, третьего и четвертого слоя является сигмовидной функцией $f(y) = \frac{1}{1+e^{-y}}$.

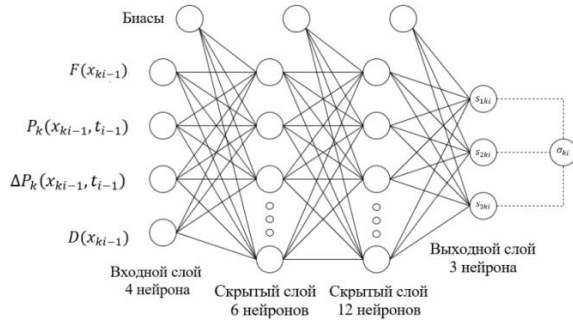


Рис. 1. Архитектура нейронной сети

Нейронная сеть N характеризуется набором весов w_p (где $p = 1, \dots, 132$) и биасов b_j (где $j = 1, \dots, 21$). Для этих параметров устанавливается следующее ограничение: $w_{max} = b_{max} = 100$. На вход нейронной сети поступают значения четырех факторов k -й окружающей среды в текущем положении зоопланктона. На выходе получается коэффициент смещения σ_{ki} , который определяется следующим образом:

$$I(s_{1ki}, s_{2ki}, s_{3ki}) = \begin{cases} -1, & \text{if } \max(s_{1ki}, s_{2ki}, s_{3ki}) = s_{1ki}; \\ 0, & \text{if } \max(s_{1ki}, s_{2ki}, s_{3ki}) = s_{2ki}; \\ 1, & \text{if } \max(s_{1ki}, s_{2ki}, s_{3ki}) = s_{3ki}. \end{cases} \quad (10)$$

$$\sigma_{ki} = I(s_{1ki}, s_{2ki}, s_{3ki}).$$

Зная текущее положение зоопланктона $x_k(t_{i-1})$, рассчитываются соответствующие характеристики окружающей среды, затем эта информация передается на вход нейронной сети и вычисляется смещение σ_{ki} и новое положение зоопланктона $x_k(t_i)$. Таким образом, повторяя эту процедуру n раз, можно смоделировать суточную траекторию передвижения зоопланктона $v_k(N) = x_k(t, N)$. Для вычисления усредненной функции приспособленности необходимо повторить этот процесс K раз. Затем созданная нейронная сеть обучается, выбирая значения весов и смещений таким образом, чтобы максимизировать функцию приспособленности:

$$\max_{\substack{|w_l| \leq w_{max} \\ |b_l| \leq b_{max}}} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K J_k(v_k(N)). \quad (11)$$

Значения параметров

Используются следующие численные значения параметров: $\xi_1 = 0,02$, $\xi_2 = 0,025$, $\xi_3 = \xi_4 = 0,105$, $\eta_1 = \eta_2 = 1,15$, $c_1 = c_2 = -100$, $c_3 = -10$, $c_4 = -120$, $\alpha = 0,4$, $\beta = 0,46$, $\gamma = \delta = 0,025$, $n = 1440$, $v = 1$, $x_0 = -15$, $\xi_5 = 0,27 \times 10^{-3}$. В таблице 1 приведено время начала нис-

ходящей миграции t_{rk} и времена начала восходящей миграции t_{sk} в различных сезонах.

Таблица 1

Время начала нисходящей и восходящей миграции зоопланктона

	Апрель $k = 1$	Июнь $k = 2$	Сентябрь $k = 3$	Декабрь $k = 4$
t_{rk}	6	3,7	5,3	7,5
t_{sk}	19,55	21,3	19,88	17

Метод обучения

Для определения оптимальных весов нейронной сети используется алгоритм «Выживание наиболее приспособленных» (SoFA). Подробное описание алгоритма можно найти в работах [5–7, 13]. Это эволюционный алгоритм, который использует популяцию агентов и операторы мутации, кроссовера и селекции для эволюции популяции в направлении глобального оптимума заданной функции приспособленности. Этот метод основан на идее Дарвина о выживании наиболее приспособленных, и его преимущество состоит в доказанной сходимости. Вероятность нахождения оптимального значения функции приспособленности приближается к единице при увеличении числа итераций g до бесконечности. В этом алгоритме итерация g означает применение операторов мутации, кроссовера и отбора ко всей популяции. Этот метод также сравнивался с другими эвристическими и эволюционными алгоритмами, демонстрируя свою эффективность [13].

Для обучения нейронной сети мы рассматриваем три тренировочных среды: апрель, июнь и сентябрь ($K = 3$), каждая с соответствующей функцией приспособленности J_k . Для тестирования разработанной обратной связи мы используем декабрьскую среду с функцией приспособленности J_4 .

Результаты

Нейронная сеть обучалась на трех тестовых средах и сгенерировала стратегии миграции зоопланктона в четырех сезонах. В таблице 2 приведено сравнение значений функций приспособленности J_k для стратегий миграции в каждом сезоне, полученных с помощью нейронной сети, обученной с использованием усредненной суммы функций приспособленности J_k , и лучших значений функций приспособленности J_k^* для каждой конкретной среды, полученных путем переобучения нейронной сети на одной соответствующей среде.

Таблица 2

Сравнение полученных значений функций приспособленности

	Апрель	Июнь	Сентябрь	Декабрь
J_k	6,69	5,94	6,02	6,64
J_k^*	6,7	5,97	6,03	6,69

На рис. 3 приведены стратегии миграции (сплошной линией), полученные с использовани-

ем нейронной сети. Эти стратегии сравниваются с натурными наблюдениями (пунктирные линии), а именно с верхней и нижней границей наблюдаемой миграции. Можно заметить, что смоделированные стратегии миграции соответствуют натурным наблюдениям.

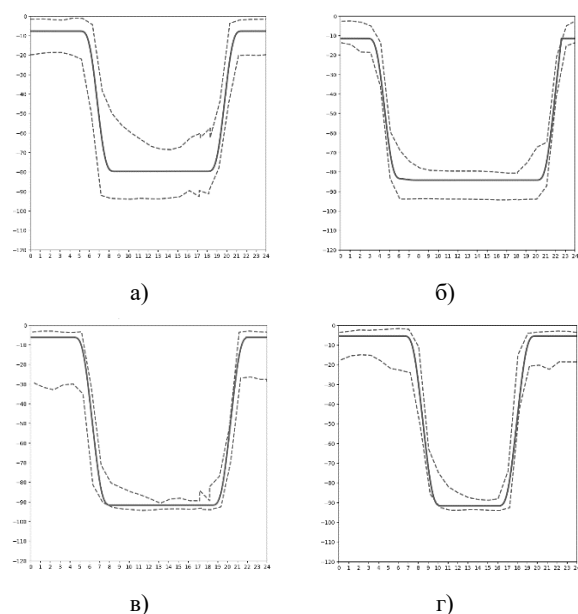


Рис. 2. Сравнение построенных нейронной сетью стратегий миграций (сплошная линия) с натурными наблюдениями (пунктирная линия) в апреле (а); июне (б); сентябре (в); декабре (г). По горизонтали – время (часы), по вертикали – глубина (метры)

Заключение

Данное исследование представляет новый подход к моделированию суточной вертикальной миграции зоопланктона с учетом сезонных изменений. Он основан на механизме обратной связи, который связывает поведение организма с текущим состоянием окружающей среды. Для этого используется нейронная сеть, которая принимает входные значения факторов среды текущего положения зоопланктона и моделирует соответствующее локальное перемещение зоопланктона. Веса сети настраиваются с использованием эволюционного алгоритма оптимизации «Выживание наиболее приспособленных» (SoFA) с целью максимизации усредненной функции приспособленности зоопланктона по сезонам. Результаты показывают, что данный подход способен моделировать оптимальные стратегии поведения зоопланктона для различных условий окружающей среды,

включая сезонные изменения. Стратегия, полученная с помощью этого подхода, соответствует реальному паттерну вертикальной миграции, наблюдаемому в заливе Саанич, Британская Колумбия, Канада. Таким образом, нейронные сети и эволюционные алгоритмы представляют мощный фреймворк для изучения адаптации и стратегий выживания в ответ на изменяющиеся условия окружающей среды.

Литература

1. Parvinen K., Dieckmann U., Heino M. Function-valued adaptive dynamics and the calculus of variations // *Journal of Mathematical Biology*. 2006. V. 52, № 1. P. 1–26.
2. Clark C., Mangel M. *Dynamic state variable models in ecology* // Oxford University Press. 2000.
3. Archibald K.M., Siegel D.A., Doney S.C. Modeling the impact of zooplankton diel vertical migration on the carbon export flux of the biological pump // *Global Biogeochemical Cycles*. 2019. V. 33, № 2. P. 181–199.
4. Bandara K., Varpe Ø., Wijewardene L., Tverberg V., Eiane K. Two hundred years of zooplankton vertical migration research // *Biol Rev*. 2021. V. 96. P. 1547–1589.
5. Kuzenkov O., Morozov A. Towards the construction of a mathematically rigorous framework for the modelling of evolutionary fitness // *Bulletin of Mathematical Biology*. 2019. V. 81, № 11. P. 4675–4700.
6. Kuzenkov O., Morozov A. Towards developing a general framework for modelling vertical migration in zooplankton // *Journal of Theoretical Biology*. 2016. V. 405. P. 17–28.
7. Kuzenkov O., Perov D. Construction of Optimal Feedback for Zooplankton Diel Vertical Migration // *Communications in Computer and Information Science*, Springer. 2022. V. 1739.
8. Xingui H., Shaohua X. Feedback process neural networks // *Process Neural Networks*. 2010. P. 128–142.
9. Salimans T., Ho J., Chen X., Sidor S., Sutskever I. *Evolution strategies as a scalable alternative to reinforcement learning*. 2017.
10. Hannah B. An acoustical analysis of the variability of the diel vertical migration of zooplankton in Saanich Inlet // *Oceans first journal*. 2015.
11. Sato M., Dower J.F., Kunze E., Dewey R. Second-order seasonal variability in diel vertical migration timing of euphausiids in a coastal inlet // *Marine Ecology Progress Series*. 2013. V. 480. P. 39–56.
12. Тренкениу Р.П., Лелеков А.С., Чекушкин А.А. Применение линейных сплайнов при моделировании суточного изменения инсоляции // *Вопросы современной альгологии*. 2020. № 3 (24). С. 42–49.
13. Kuzenkov O., Perov D. Global Optimization Method Based on the Survival of the Fittest Algorithm // *Communications in Computer and Information Science*. 2022. V. 1750.

Вклад инсулина в синаптическую пластичность гиппокампа

А.Л. Проскура, С.О. Вечкапова, А.С. Ратушняк

ФИЦ Институт вычислительных технологий, Новосибирск,
annleop@mail.ru

Введение

Реализация высших когнитивных функций, таких как мышление, память, обучение, базируется на синаптических сетях мозга, активность которых поддерживается сбалансированной работой возбуждающих и тормозных нейрональных систем. Их разбалансировка лежит в основе нарушения протекания ментальных процессов в когнитивных системах, дисфункции как на уровне нейронов, так и отдельных областей мозга, что в итоге может приводить к развитию возрастных патологий, нейродегенеративным расстройствам [1], отклонениям, связанными с общими метаболическими нарушениями [2–4].

Инсулин – гормон, продуцируемый поджелудочной железой – проникает через гематоэнцефалический барьер и вырабатывается различными отделами мозга. Он имеет широкий спектр влияния на метаболические процессы в периферических тканях, ключевым из которых является потребление глюкозы [5]. Церебральный инсулин регулирует синаптическую пластичность, память и реализацию когнитивных функций [6, 7]. Периферическая резистентность к инсулину вызывает выраженное нарушение функций головного мозга, убедительно показывая взаимосвязь между метаболическими и когнитивными нарушениями [8].

Сигнальный путь инсулина и его рецептора достаточно хорошо описаны, по крайней мере для периферических тканей, при этом ключевым является транслокации инсулинозависимых переносчиков глюкозы [9, 10]. Однако нет полного понимания, как на молекулярном уровне инсулин влияет на широкий спектр реакций, обеспечивающих как метаболические аспекты жизнедеятельности нейрона, так и его информационные функции, которые являются основными в его специализации. Данному направлению и посвящена представленная работа.

Инсулин и нейротрансмиссия в гиппокампе

Нейроны, отвечающие за протекание когнитивных процессов, способны к анализу и дополнению образа внешнего сигнала, обеспечивая опережающее отражение внешней среды. Они нуждаются в колоссальном количестве энергии. Для выработки АТФ, необходимой для поддержания своего клеточного функционального гомеостаза, мозг потребляет большое количество кислорода [11]. Активные формы кислорода (АФК), перекись

водорода (H_2O_2) и анион-радикалы супероксида традиционно считаются токсичными побочными продуктами аэробного метаболизма [12]. Их концентрации в клетках поддерживаются на безопасном уровне, но существует риск увеличения с ростом метаболической нагрузки, при развитии какого-либо патологического процесса [13, 14].

Синапс является самостоятельной информационной единицей [15]. Его функционирование неосуществимо в отрыве от всего нейрона и синаптической сети, как собственной, так и глобальной, а также клеток глии. Синаптический сигналинг контролируется балансом возбуждения/торможения через взаимодействие глутаматергической и гамкергической систем [16]. Рецепторы инсулина хорошо представлены как на нейронах, так и на глиальных клетках [17, 18].

Ранее нами был разобран вклад периферических гормонов в функционирование когнитивной системы [19] и предложена модель молекулярного механизма модулирующего влияния инсулина на плотность синаптических глутаматных рецепторов пирамидных нейронов гиппокампа, вовлеченных в контроль эффективности возбуждающей нейротрансмиссии [20]. Мы предполагаем, что ключевой эффект инсулина на уровне возбуждающего синапса заключается в снижении его возможности увеличивать эффективность нейротрансмиссии в ситуации предшествующей активности.

Рецептор инсулина (ИР) активирует свои субстратные белки – СИР, IRSp53 (Insulin receptor substrate protein of 53 kDa) [22]. ИР и СИР запускают сигнальный путь фосфатидилинозитол-3-киназы (ФИЗК), что приводит к накоплению на мембране пула ФИФ3 (фосфатидилинозитол-3,4,5-трифосфат) из ФИФ2 (фосфатидилинозитол-4,5-дифосфат) [5, 21]. На ФИФ3 закрепляется фосфоинозитид-зависимая протеинкиназа 1 (ФЗК), которая пролонгирует активность протеинкиназ ПКС (протеинкиназа С) и ПКА (цАМФ-зависимая протеинкиназа А) [23] и активирует протеинкиназу В (ПКВ). ПКС, ПКА, IRSp53 активно вовлечены в регуляцию плотности глутаматных рецепторов и контроль синаптической эффективности в гиппокампе [20, 24–29]. ПКВ обеспечивает запуск белкового синтеза, как в соме нейрона, так и в его дендритном дереве [30], вовлечена во встраивание в плазматическую мембрану переносчиков глюкозы (GLUT) [31] и ГАМК-рецепторов [32], обеспечивающих торможение в синаптических сетях гиппокампа (рис. 1).

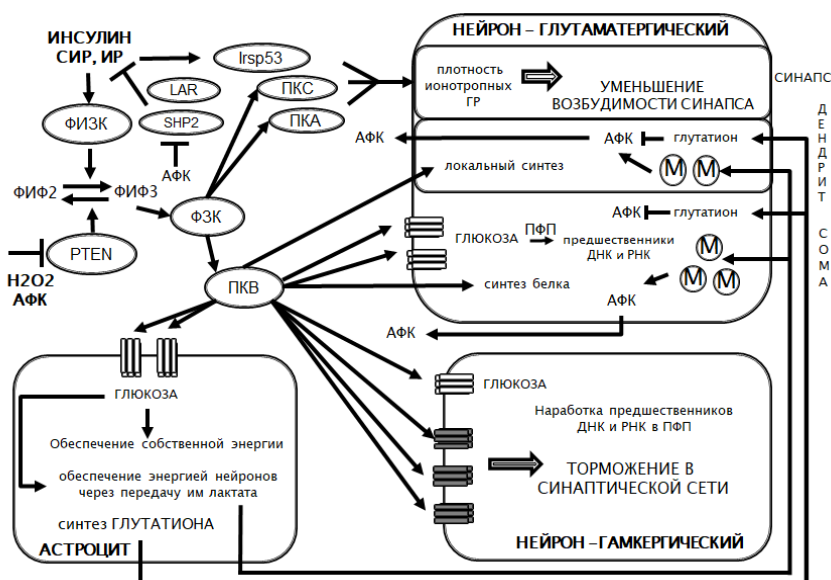


Рис. 1. Схематичное представление сигнального пути инсулина на синапсах гиппокампа.

СИР – субстрат инсулинового рецептора; ИР – инсулиновый рецептор; М – митохондрии; ФИЗК – фосфатидилинозитол-3-киназа; ФИФ2 – фосфатидилинозитол-4,5-дифосфат; ФИФ3 – фосфатидилинозитол-(3,4,5)-трифосфат; IRSp53 Insulin receptor substrate protein of 53; PTEN – phosphatase and tensin homolog deleted on chromosome 10; ПКС – протеинкиназа С; ПКА – протеинкиназа А; ФЗК – фосфоинозитид-зависимая протеинкиназа 1; ПФП – пентозофосфатный путь; LAR – Leukocyte common antigen related; H_2O_2 – перекись водорода; АФК – активные формы кислорода.

☰ глюкозный транспортёр GLUT; ☒ ГАМКа-рецепторы; → – межмолекулярные реакции; ⊣ – блокирование

Сигнальный путь ИР контролируется специфическими фосфатазами. LAR (Leukocyte common antigen related) и SHP-2 (SH2-containing phosphotyrosine phosphatase) ассоциируются с ИР на плазматической мембране [33, 34]. Фосфатаза PTEN обеспечивает дефосфорилирование липидов плазматической мембраны: ФИФ3 → ФИФ2 (рис. 1), что делает ее прямым антагонистом ФИЗК.

Для запуска и стабильной работы сигнального пути ИР необходимо ингибирование активных центров фосфатаз перекисью водорода (H_2O_2) и/или активными формами кислорода (АФК) [12].

Клетки глии окружают нейроны, обеспечивая функционирование нейронов, их энергетику через лактат [35, 36]. Пентозофосфатный путь (ПФП) является ключевым источником НАДФН в мозге, используемым как донор водорода в реакциях восстановления и гидроксирования, а также обеспечивает клетки рибозо-5-фосфатом, который участвует в биосинтезе нуклеотидов и нуклеиновых кислот, аминокислот гистидина и пр. [37]. В астроцитах синтезируется глутатион – ключевой участник антиоксидантной защиты клетки [38].

Возбуждающая глутаматергическая нейротрансмиссия находится под контролем тормозной системы, функционирование которой определяется ГАМК-нейронами.

Инсулин вовлекается в модулирование синаптической нейротрансмиссии: в возбуждающих сетях – на синапсах, в дендритах и соме, тормозных сетях вставочных нейронов через дополнительное встраивание ГАМК-рецепторов, на уровне глиальных клеток. Это происходит в тесной связи с астроцитами, которые, помимо поставки источников для производства энергии, обеспечивают нейроны глутатионом (рис. 1).

Концентрация АФК возрастает при росте энергозатрат, и инсулин будет фактором, который, с одной стороны, будет запускать поступление источника энергии в сети синапсов и снижение возбуждения на всех уровнях синаптической сети гиппокампа, с другой – поддерживать метаболическую устойчивость системы.

Литература

1. Eichler S.A., Meier J.C. E-I balance and human diseases – from molecules to networking // *Front Mol Neurosci*. 2008. V.1. P. 2.
2. Остроумова О.Д., Суркова Е.В., Ших Е.В., Реброва Е.В., Борисов М.С. Когнитивные нарушения у больных сахарным диабетом 2 типа: распространенность, патогенетические механизмы, влияние противодиабетических препаратов // *Сахарный диабет*. 2018. Т. 21, вып. 4. С. 307–318.
3. Чугунова Л.А., Семенова И.В., Орлов Ю.Ю., Шестакова М.В. Сахарный диабет 2 типа и когнитивные нарушения // *Сахарный диабет*. 2008. Т. 11, вып. 1. С. 61–66.
4. Гацких И.В., Веселова О.Ф., Брикман И.Н., Шалда Т.П., Адамян Р.А., Петрова М.М. Когнитивные нарушения при сахарном диабете 2 типа // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. вып. 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20805>
5. Sedzikowska A., Szablewski L. Insulin and insulin resistance in Alzheimer's disease // *Int. J. Mol. Sci*. 2021. V. 22, № 18. P. 9987.
6. Salcedo I., Tweedie D., Li Y., Greig N.H. Neuroprotective and neurotrophic actions of glucagon-like peptide-1: an emerging opportunity to treat neurodegenerative and cerebrovascular disorders: Neurological benefits of GLP-1 receptor activation // *Br J Pharmacol*. 2012. V. 166, № 5. P. 1586–1599.
7. Yu L-Y, Pei Y. Insulin Neuroprotection and the Mechanisms // *Chin Med J (Engl)*. 2015. V. 128, № 7. P. 976–981.

8. Sripetchwandee J., Chattipakorn N., Chattipakorn S.C. Links Between Obesity-Induced Brain Insulin Resistance, Brain Mitochondrial Dysfunction, and Dementia // *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2018. V. 9. P. 496.
9. Olson A.L., Pessin J.E. Structure, function, and regulation of the mammalian facilitative glucose transporter gene family // *Annual Review of Nutrition*. 1996. V. 16. P. 235–256.
10. Newsholme E.A., Dimitriadis G. Integration of biochemical and physiologic effects of insulin on glucose metabolism // *Experimental and Clinical Endocrinology & Diabetes*. 2001. V. 109, № 2. P. S122–S134.
11. Halliwell B. Oxidative stress and neurodegeneration: where are we now? // *J. Neurochem*. 2006. V. 97, № 6. P. 1634–1658.
12. Pomytkin I.A. H₂O₂ signalling pathway: a possible bridge between insulin receptor and mitochondria // *Curr Neuropharmacol*. 2012. V. 10, № 4. P. 311–320.
13. Aoyama K., Nakaki T. Glutathione in cellular redox homeostasis: association with the excitatory amino acid carrier 1 (EAAC1) // *Molecules*. 2015. V. 20, № 5. P. 8742–8758.
14. Mari M., de Gregorio E., de Dios C., Roca-Agujeta V., Cucarull B., Tutusaus A., Morales A., Colell A. Mitochondrial glutathione: recent insights and role in disease // *Antioxidants (Basel)*. 2020. V. 9, № 10. P. 909.
15. Proskura A.L., Ratushnyak A.S., Vechkapova S.O., Zapara T.A. Synapse as a multi-component and multi-level information system // *Studies in computational intelligence*. 2018. V. 736. P. 186–192.
16. Sears S.M., Hewett S.J. Influence of glutamate and GABA transport on brain excitatory/inhibitory balance // *Exp Biol Med (Maywood)*. 2021. V. 246, № 9. P. 1069–1083.
17. Derakhshan F., Toth C. Insulin and the brain // *Curr Diabetes Rev*. 2013. V. 9, № 2. P. 102–116.
18. Blázquez E., Velázquez E., Hurtado-Carneiro V., Ruiz-Albusac J.M. Insulin in the brain: its pathophysiological implications for States related with central insulin resistance, type 2 diabetes and Alzheimer's disease // *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2014 V. 5. P. 161.
19. Проскура А.Л., Вечкапова С.О., Ратушняк А.С. Вклад периферических гормонов в функционирование когнитивной системы // *Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2021: труды VII Всероссийской конференции (20–24 сентября 2021)*. Нижний Новгород, 2021. С. 121–124.
20. Проскура А.Л., Вечкапова С.О., Ратушняк А.С. Инсулин как модулятор перестроек в макрокомплексах дендритных шипиков гиппокампа // *Рецепторы и внутриклеточная сигнализация: сборник статей (22–26 мая 2023)*. Пушино, 2023. Т. 2. С. 458–462.
21. Помыткин И.А., Красильникова И.А., Пинелис В.Г., Каркищенко Н.Н. Инсулиновый рецептор в мозге: новая мишень в лечении центральной инсулиновой резистентности // *Биомедицина*. 2018. Т. 3. С. 17–34.
22. Heung M.Y., Visegrady B., Fütterer K., Machesky L.M. Identification of the insulin-responsive tyrosine phosphorylation sites on IRSp53 // *Eur J Cell Biol*. 2008. V. 87, № 8–9. P. 699–708.
23. Pearce L.R., Komander D., Alessi D.R. The nuts and bolts of AGC protein kinases // *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2010. V. 11, № 1. P. 9–22.
24. Проскура А.Л., Малахин И.А., Турнаев И.И., Суслов В.В., Запара Т.А., Ратушняк А.С. Межмолекулярные взаимодействия в функциональных системах нейрона // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2013. Т. 17. С. 620–628.
25. Seidenman K.J., Steinberg J.P., Hagan R., Malinow R. Glutamate receptor subunit 2 Serine 880 phosphorylation modulates synaptic transmission and mediates plasticity in CA1 pyramidal cells // *J Neurosci*. 2003. V. 23, № 27. P. 9220–9228.
26. Lee H.K., Barbarosie M., Kameyama K., Bear M.F., Hagan R.L. Regulation of distinct AMPA receptor phosphorylation sites during bidirectional synaptic plasticity // *Nature*. 2000. V. 405, № 6789. P. 955–959.
27. Sawallisch C., Berhörster K., Disanza A., Mantoani S., Kintscher M., Stoenica L., Dityatev A., Sieber S., Kindler S., Morellini F., Schweizer M., Boeckers T.M., Korte M., Scita G., Kreienkamp H.J. The insulin receptor substrate of 53 kDa (IRSp53) limits hippocampal synaptic plasticity // *J. Biol. Chem*. 2009. V. 284, № 14. P. 9225–9236.
28. Thomas E.A., Foye P.E., Alvarez C.E., Usui H., Sutcliffe J.G. Insulin receptor substrate protein p53 localization in rats suggests mechanism for specific polyglutamine neurodegeneration // *Neurosci Lett*. 2001. V. 309, № 3. P. 145–148.
29. Hori K., Yasuda H., Konno D., Maruoka H., Tsutomoto T., Sobue K. NMDA receptor-dependent synaptic translocation of insulin receptor substrate p53 via protein kinase C signaling // *J Neurosci*. 2005. V. 25, № 10. P. 2670–2681.
30. Чеснокова Е.А., Колосов П.М. Локальный синтез белка в дендритных окончаниях и способы его регуляции в норме и при пластических изменениях // *Журн. высшей нервной деятельности*. 2016. Т. 66, вып. 2. С. 163–180.
31. Miinea C.P., Sano H., Kane S., Sano E., Fukuda M., Peränen J., Lane W.S., Lienhard G.E. AS160, the Akt substrate regulating GLUT4 translocation, has a functional Rab GTPase-activating protein domain // *Biochem J*. 2005. V. 39, Pt. 1. P. 87–93.
32. Wang Q., Liu L., Pei L., Ju W., Ahmadian G., Lu J., Wang Y., Liu F., Wang Y.T. Control of synaptic strength, a novel function of Akt // *Neuron*. 2003. V. 38, № 6. P. 915–928.
33. Klamann L.D., Boss O., Peroni O.D., Kim J.K., Martino J.L., Zabolotny J.M., Moghal N., Lubkin M., Kim Y.B., Sharpe A.H., Stricker-Krongrad A., Shulman G.I., Neel B.G., Kahn B.B. Increased energy expenditure, decreased adiposity, and tissue-specific insulin sensitivity in protein-tyrosine phosphatase 1B-deficient mice // *Mol Cell Biol*. 2000. V. 20, № 15. P. 5479–5489.
34. Ahmad F., Goldstein B.J. Goldstein Functional association between the insulin receptor and the transmembrane protein-tyrosine phosphatase LAR in intact cells // *J. Biol. Chem*. 1997. V. 272, № 1. P. 448–457.
35. Bolaños J.P., Almeida A., Moncada S. Glycolysis: a bioenergetic or a survival pathway? // *Trends Biochem Sci*. 2010. V. 35, № 3. P. 145–149.
36. Rabinowitz J.D., Enerbäck S. Lactate: the ugly duckling of energy metabolism // *Nat. Metab*. 2020. V. 2, № 7. P. 566–571.
37. Ветровой О.В. Роль HIF1-зависимой супрессии пентозофосфатного пути в патогенезе постгипоксической реоксигенации мозга // *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*, 2020, Т. 56, № 7. С. 552.
38. Aoyama K. Glutathione in the brain // *Int. J. Mol. Sci*. 2021. V. 22, № 9. P. 5010.

Стратегии поведения самцов и самок крыс в классической парадигме активного избегания: когнитивные способности в задаче с негативным подкреплением

М.Е. Пупкина^{1,2}, Е.Ю. Ситникова¹

¹ Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, mariapurikina@yandex.ru

² Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина

Активное избегание (или условная реакция двухстороннего избегания, УРДИ) – экспериментальная поведенческая парадигма обучения лабораторных крыс, основанная на переходе из потенциально опасного отсека в безопасный после включения условного стимула. При невыполнении задачи в течение заданного времени включается электрокожное раздражение слабым электрическим током (отрицательное подкрепление). Реакция избегания – это естественное адаптивное поведение в ответ на опасность. Обучение реакции избегания относится к инструментальному обучению. Этот тест широко используется для оценки когнитивных функций у крыс. Цель данной работы – выявить особенности стратегий в стандартном тесте «активное избегание» у самок и самцов. Обнаружено, что самки лучше, чем самцы, выполняли этот тест. Самцы чаще проявляли пассивную стратегию (замирание или freezing) и чаще издавали сигналы тревоги и беспокойства в ультразвуковом диапазоне.

УРДИ – это классическая методика исследования процессов обучения и памяти у грызунов и человека [1, 2]. У лабораторных крыс этот тест выполняется в челночной камере, разделенной на два отсека. Крыса может получить слабое электрокожное раздражение в каждом из отсеков после предъявления условного (т. е. предупреждающего) стимула – звукового или светового сигнала. Крыса должна перейти в соседний отсек, который всегда является безопасным.

Не существует единых критериев оценки выполнения УРДИ. Мы выделяем четыре стратегии выполнения данного теста, которые характеризуют когнитивные особенности каждого животного:

– Избегание – крыса переходит в «безопасный» отсек после предъявления условного стимула (звук), избегая электрокожного раздражения.

– Избавление – крыса переходит в «безопасный» отсек во время нанесения электрокожного раздражения.

– Пассивная реакция – крыса не переходит в «безопасный» отсек во время нанесения электрокожного раздражения, остается на месте, терпит раздражение.

– Не полностью выученное избегание – когда реакция отсрочена во времени и незначительно отличается от реакции времени начала без условного стимула.

Крысы издают ультразвуковые сигналы, которые нужно регистрировать. Частотно-временные

характеристики ультразвуковой вокализации у крыс меняются в зависимости от социальных ситуаций и эмоционального состояния [3]. Выделяют две категории ультразвуковых вокализаций:

– Сигналы, связанные с положительным эмоциональным состоянием – короткие вокализации с частотой 45–50 кГц.

– Сигналы, связанные с негативным эмоциональным состоянием – длительные вокализации с частотой 20–25 кГц [3, 4].

Метод условно-рефлекторного избегания

В данной работе использован однодневный тест УРДИ, он проводился в челночной камере, которая состояла из двух отсеков (30 x 26 x 30 см) с проходом между ними. Пол в обоих отсеках состоял из трехмиллиметровых прутьев из нержавеющей стали, по которым подавался электрический ток. Тестирование проводили у крыс в возрасте 7–8 месяцев. До начала теста в течение 3 минут крысу помещали в камеру для привыкания к обстановке. Во время тестирования крысы обучались избегать воздействия электрического тока (0,5 мА, электрокожное раздражение, безусловный стимул), который следовал через 4,5 с после предъявления звука силой 70 дБ (условный стимул), перемещаясь в соседний (безопасный) отсек. Интервал между предъявлениями стимулов длился от 30 до 40 с (длительность определялась случайным образом). Электрический ток подавался в тот отсек, в котором находилась крыса. Если крыса не переходила в «безопасный» отсек в течение 40 с, электрическая стимуляция прекращалась, и следующая попытка начиналась после 30–40 с межстимульного интервала. Подача стимулов контролировалась программно с помощью ПК. Экспериментатор находился в соседней комнате и наблюдал за экспериментом через видеокамеру (JVS GR-DVP7, Китай), расположенную над камерой УРДИ. Исследование выполнено на 50 крысах (возраст 5–8 месяцев; 19 самок и 31 самец). Использовали крыс подлинии NEW, которые были выведены нами из крыс линии WAG/Rij по признаку отсутствия абсанс-эпилепсии. Все самки были протестированы в фазу диэструса эстрального цикла.

Тест УРДИ включал 50 предъявлений стимула вне зависимости от эффективности обучения. Если крыса не переходила в безопасный отсек в течение 20 предъявлений (пассивная стратегия или freezing), тестирование прекращали. Схема обучения в данной методике изображена на рис. 1.

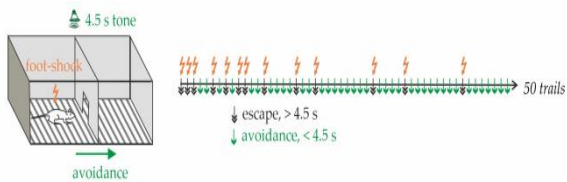


Рис. 1. Схема камеры с двумя отсеками, в которой крысе предъявляли условный стимул (звуковой сигнал в течение 4,5 с) и безусловный стимул (электрокожное раздражение лап, foot-shock). Avoidance – избегание; escape – избавление. Иллюстрация из [5]

Избегание (зеленые стрелки на рис. 1) было усвоенной реакцией, позволяющей избежать электрокожного раздражения после включения звукового сигнала, продолжающегося 4,5 с (время реакции < 4,5 с); избавление – перемещение в безопасный отсек во время электрической стимуляции и после прекращения подачи сигнала (черные стрелки на рис. 1).

Метод оценки ультразвуковой вокализации

Параллельно УРДИ проводили запись ультразвуковой вокализации с целью охарактеризовать эмоциональное состояние крыс в стрессовой ситуации. Ультразвуковая вокализация была исследована у 21 самца и 9 самок в течение 3-минутного периода адаптации и в течение всего теста.

Использовали оборудование Sonotrack (Metris, Хофддорп, Нидерланды) для неинвазивной записи и анализа ультразвуковых вокализаций. Система состояла из блока управления Sonotrack, ультразвукового микрофона и программного обеспечения Sonotrack версии 2.6.2.30. Фоновый шум был значительно снижен благодаря настройкам программы и небольшому углу раскрытия микрофона. С помощью системы Sonotrack мы записали низкочастотные звуковые сигналы, провели полный спектральный анализ (15–100/125 кГц).

Результаты

Анализ результатов тестирования показал, что ~26% самцов не обучались в тесте УРДИ и проявили пассивную стратегию. Это согласуется с литературными данными, демонстрирующими, что самки крыс меньше проявляют пассивную реакцию (freezing), чем самцы [6].

Соотношение хорошо и плохо обучившихся самок составило 76 : 24%, а самцов 61 : 13% (26% самцов не смогли учиться). Динамика обучения у плохо обучающихся самок была аналогична таковой у хорошо обучающихся самцов.

Реакции, время которых значимо не отличалось от 4,5 с («+» на рис. 2) можно рассматривать как быстрые реакции избавления или недостаточно выученные реакции избегания. Подобная стратегия чаще встречалась у самок.

Во время 3-минутной адаптации ни самцы, ни самки не издавали аверсивных ультразвуковых сигналов. Во время обучения активному избеганию издавали ультразвуковые сигналы тревоги 11 самцов (52,4%) и 5 самок (55,6%). Средняя ча-

стота этих сигналов у самцов и самок не отличалась и колебалась в пределах 24–25 кГц (рис. 3), но суммарная продолжительность аверсивной вокализации во время тестовой сессии у самцов была значительно выше, чем у самок (рис. 3).

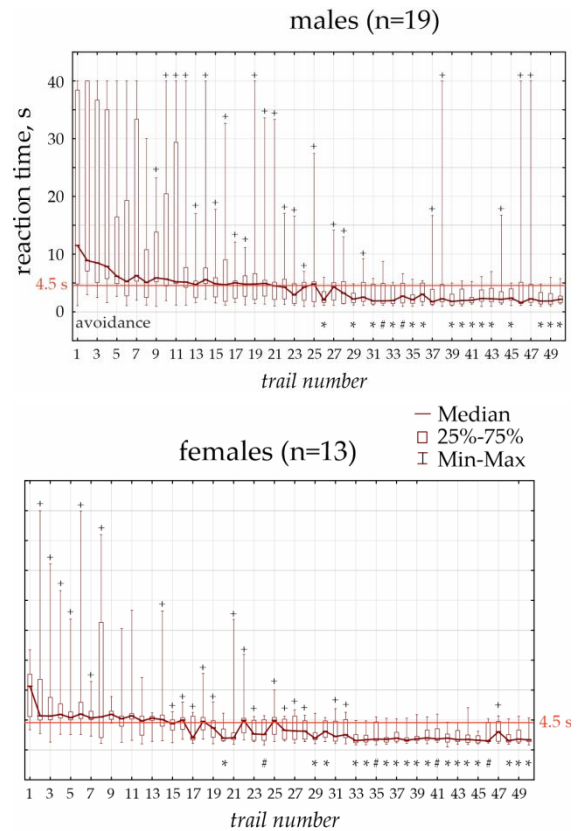


Рис. 2. Результаты выполнения задачи активного избегания у самок и самцов. По времени реакции значимые различия от 4,5 с обозначены знаком «*» ($p < 0,001$) (поправка Бонферрони для крыс с ошибками в 50 тестах); # – $p < 0,01$. Незначительные различия от 4,5 с обозначены знаком «+» и указывают на промежуточные или быстрые реакции избегания. На оси y – время реакции в секундах, на оси x – номер попытки. Иллюстрация из [5]

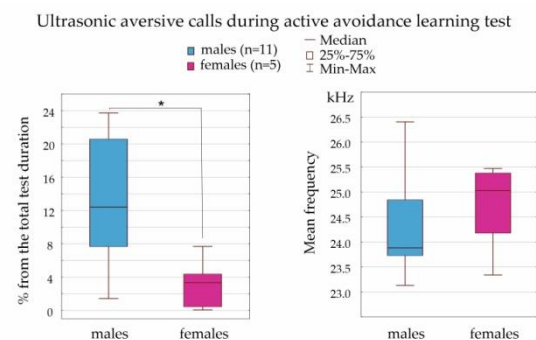


Рис. 3. Плотность аверсивной ультразвуковой вокализации у самцов (светло-серый цвет) и самок (темно-серый цвет) во время теста активного избегания. * – значимые различия между самцами и самками ($p < 0,05$, U – критерий Манна-Уитни). Иллюстрация из [5]

Установлено, что самцы чаще самок издавали сигналы тревоги частотой 24–25 кГц. Следовательно, самцы чаще выражали свое эмоциональное состояние. Аналогичным образом Ребекка

Мачадо Фигейредо и соавторы [7] отметили, что самки во время изоляции издавали гораздо меньше ультразвуковых сигналов частотой 22 кГц, чем самцы. Мы предполагаем, что самцы больше подвержены стрессу во время аверсивных тестов.

Выводы

Итак, только самцы проявляли пассивную стратегию и чаще вокализировали. Самки чаще всего демонстрировали избегание и не до конца выученное избегание.

Формирование ассоциативного страха у самок происходило быстрее, чем у самцов. Таким образом, самки демонстрировали более высокие способности к обучению.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 23-25-00166).

Литература

1. *Luvisetto S., Basso E., Petronilli V., Bernardi P., Forte M.* Enhancement of anxiety, facilitation of avoidance behavior, and occurrence of adult-onset obesity in mice lacking mitochondrial cyclophilin D // *Neuroscience*. 2008. V. 155. P. 585–596.
2. *Moscarello J.M., LeDoux J.E.* Active Avoidance Learning Requires Prefrontal Suppression of Amygdala-Mediated Defensive Reactions // *J. Neurosci.* 2013. V. 33. P. 3815–3823.
3. *Brudzynski S.M.* Biological Functions of Rat Ultrasonic Vocalizations, Arousal Mechanisms, and Call Initiation // *Brain Sci.* 2021. V. 11. P. 605. doi: 10.3390/brainsci11050605.
4. *Brudzynski S.M.* Communication of Adult Rats by Ultrasonic Vocalization: Biological, Sociobiological, and Neuroscience Approaches // *ILAR J.* 2009. V. 50. P. 43–50. doi: 10.1093/ilar.50.1.43.
5. *Pupikina M., Sitnikova E.* Sex Differences in Behavior and Learning Abilities in Adult Rats // *Life (Basel)*. 2023. V. 13. Pt 2. P. 547. doi: 10.3390/life13020547.
6. *Shanazz K., Dixon-Melvin R., Nalloor R., Thumar R., Vazdarjanova A.I.* Sex Differences In Avoidance Extinction After Contextual Fear Conditioning: Anxiolytic Behavior In Female Rats // *Neuroscience*. 2022. V. 497. P. 146–156. doi:10.1016/j.neuroscience.2022.06.031.
7. *Machado Figueiredo R., de Carvalho M.C., Brandão M.L., Lovick T.A.* Short-Term, Low-Dose Fluoxetine Prevents Oestrous Cycle-Linked Increase in Anxiety-like Behaviour in Female Rats // *J. Psychopharmacol.* 2019. V. 33. P. 548–557. doi: 10.1177/0269881119841833.

Моделирование биологических функциональных когнитивных систем через эволюцию негэнтропийных агентов

А.С. Ратушняк, А.Л. Проскура, Р.Р. Хусаинов

ФИЦ Информационных и вычислительных технологий, Новосибирск,
ratushniak.alex@gmail.com

При моделировании биологических когнитивных функциональных молекулярных систем (БФС) нужно исходить из предположения, что они по существу являются цифровыми логическими устройствами, обладающими прогностической функцией, на базе информации, полученной при взаимодействии с окружающей средой. Учитывая дискретность БФС, их моделирование, вероятно, наиболее продуктивно вести с использованием математического аппарата, применимого для дискретных моделей, таких как логические модели, вероятностные булевы сети, сети Петри, цепи Маркова, агентные модели и т. д. Однако при моделировании необходимо учитывать не упрощаемую сложностью этих систем. Внутренняя молекулярная машина самых простейших из существующих сейчас одноклеточных организмов не может быть смоделирована без существенных упрощений. При этом такие упрощения ведут, как правило, к получению недостаточно функционально и прогностически валидных результатов.

В связи с этой проблемой представляется целесообразным создание модели предельно простых супрамолекулярных конструкций, которые флуктуационно формировались в период возникновения живых систем и, вероятно, существуют сейчас в составе более сложных многоуровневых комплексов в клетках. Эти системы должны были обладать первичными признаками живого. Как термодинамически открытые системы, способны сохранять или увеличивать комплексную негэнтропию. Формироваться такие молекулярные комплексы могли с некоторым запасом негэнтропии. Эволюционное преимущество в виде возможности накопления негэнтропии (энергии, информации, структурной упорядоченности) позволяло продолжительное существование в среде с определенным набором факторов. В дальнейшем из таких эволюционно удачных супрамолекулярных конструкций строились, вероятно, более сложные многоуровневые системы уровня одноклеточных, что позволяло расширить нишу их возможного существования.

Моделирование негэнтропийного агента

В данной работе предпринята попытка моделирования простейших первичных негэнтропийных агентов как базовой единицы живых систем. Разработан алгоритм функционирования агента и среды, в которой он способен существовать. Такая система содержит: 1) набор рецепторов в соответ-

ствии с набором физических процессов в той пространственной (экологической) нише, в которой формируется агент; 2) набор эффекторов, позволяющих избежать энтропийных воздействий и/или приобретения информационных и энергетических ресурсов; 3) достаточно простую молекулярную конструкцию, выполняющую логические функции.

Логическая обработка сигналов от рецепторов состоит в осуществлении выделения ассоциированных сигналов, запоминание ассоциации и, в последующем, опережающее включение соответствующих эффекторов для стабилизации или увеличения суммарной негэнтропии.

Предпосылки моделирования возникновения биологических систем

При анализе предпосылок возникновения биологических систем необходимо исходить из возможных условий их спонтанного формирования. В эти условия входит наличие необходимых молекулярных компонентов, взаимодействующих с достаточно значимой вероятностью, нескольких взаимосвязанных процессов (факторов) и энергоинформационного градиента. Возникающие конструкции, взаимодействуя с окружающей средой, должны выполнять базовые функции, присущие живому. К такой базовой функции следует отнести способность сохранять устойчивость организации биологической системы при замыкании петли обратной связи организма с внешним миром [1, 2]. При этом необходимо учитывать, что реакция системы на внешние факторы зависит не только от наличия раздражителей, но и от прежних воздействий [3–5], т. е. от памяти и опережающего отражения. Роль компонентов, из которых (вероятно, спонтанно) формировались разнообразные конструкции, выполняли достаточно простые молекулы, присутствующие в среде и способные выполнять функции логических элементов [6]. Из таких элементов могли возникать конструкции с некоторым запасом устойчивости (негэнтропии) при взаимодействии с факторами среды, «определяющие» (и запоминающие) взаимосвязь внешних воздействий и обладающие эффектором, обеспечивающим реагирование [7–9].

В данной работе предпринята попытка разработки модели возникновения простейших негэнтропийных биосистем. Разработаны варианты алгоритмов (рис. 1) и реализован программный код.

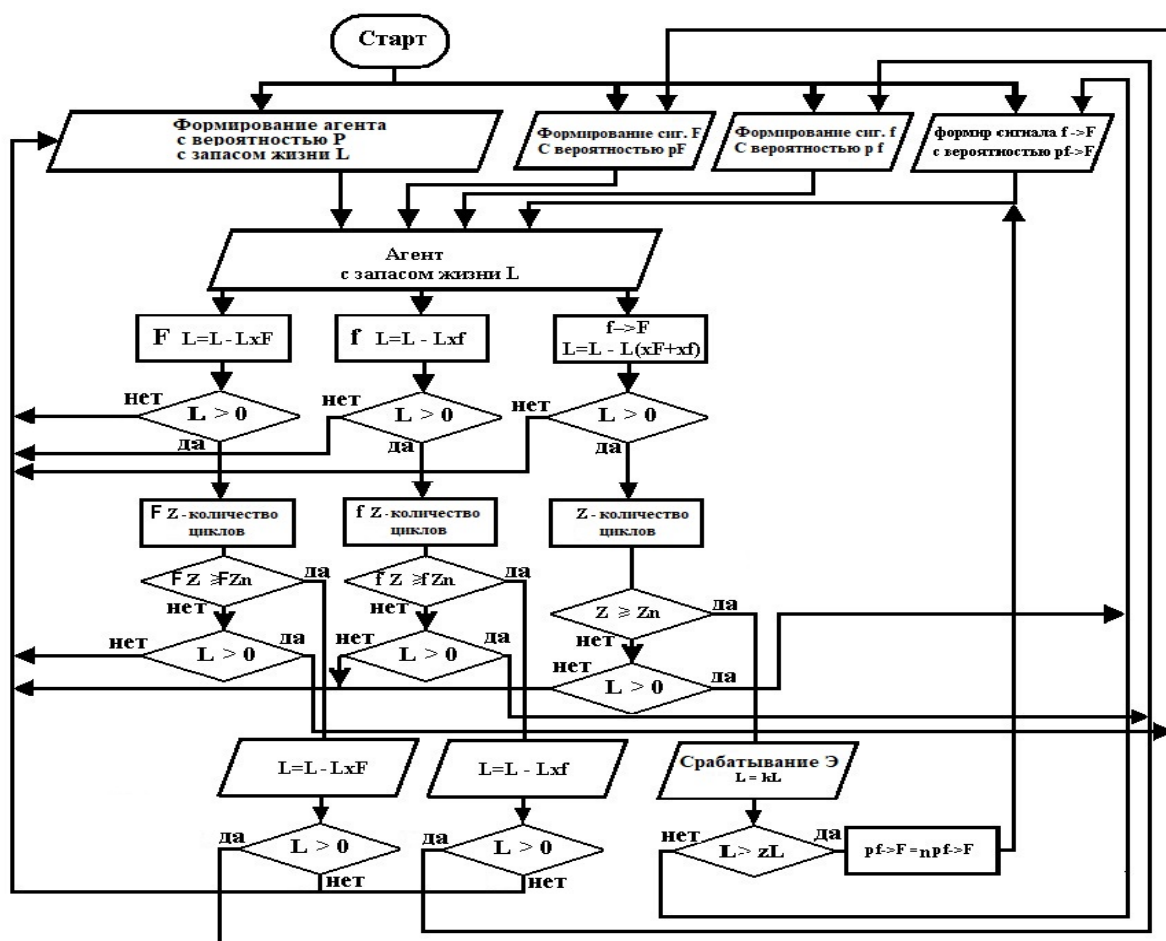


Рис. 1. Эскизный вариант алгоритма функционирования агента в среде с двумя факторами. Объяснения в тексте

Описание алгоритма

Агент – это объединенный набор элементов, которые, благодаря взаимодействию друг с другом, приобретают дополнительные функции (свойства). В эти свойства входит возможность выполнять простейшие логические операции – определения взаимосвязанности событий, их запоминания, прогноза на основе предыдущего «опыта» и реагирования, опережающего сами события во внешней среде. Таким образом, Агент соответствует базовой функции протозивной системы.

Структура каждого Агента следующая.

Агент на старте имеет «Стартовое количество энергии» L , которое не может превышать задаваемый максимум.

У Агента имеются структурные элементы, выполняющие роль рецепторов, которыми он считывает приходящие события, формируя сигнал. После того, как сигнал считается, он будет обработан элементами посредством простейших логических операций «И/ИЛИ» и памяти. Затем (после обработки) срабатывает эффектор (Э). Агент приобретает некоторое количество энергии (nL). При этом, если L превышает заданный порог, то происходит увеличение вероятности появления взаимосвязанных сигналов.

Разработана программа по следующему алгоритму:

1. Старт. {Переход на п. 2–5.}

На старте происходит формирование Агента, который после воздействия сигналов f и F запоминает, какие сигналы были, и при повторе последовательности реагирует с меньшими потерями.

2. Формирование Агента с вероятностью p и с запасом жизни L . {Переход на п. 6.}

3. Формирование сигнала F с вероятностью pF . {Переход на п. 6.}

Сигнал f незначительно увеличивает энтропию, и вычитание из L за реакцию от него небольшое, однако его вполне достаточно, чтобы Агент зафиксировал это воздействие и после nF (предшествующих nF) вызвал срабатывание эффектора. При этом исключается потеря неэнтропии и/или приобретение дополнительной L .

4. Формирование сигнала f с вероятностью pf . {Переход на п. 6.}

Сигнал F , следующий за сигналом f , вызывает значительную потерю L (величина задается исходно).

5. Формирование взаимосвязанных сигналов $f \rightarrow F$ с вероятностью $pf \rightarrow F$. {Переход на п. 6.}

При этом сигналы необязательно должны быть связаны причинно-следственно. Такая связанность определяется в дальнейшем по соотношению вероятностей формирования, связанных $f \rightarrow F$ и не ассоциированных f и F сигналов. Если сигналы не имеют причинно-следственной связи, Агент удаляет из памяти данные об их связанности.

6. Агент с запасом L . {Переход на п. 7–9.}

На старте происходит формирование Агента, который после воздействия сигналов f и F запоминает, какие сигналы были, и при повторе последовательности реагирует с меньшими потерями; в противном случае данный Агент, теряя L до задаваемого предела, деактивируется. Переход на новый цикл.

7. $FL = L - L * xF$. {Переход на п. 10.}

8. $fL = L - L * xf$. {Переход на п. 11.}

После реализации последовательности сигналов создается набор Агентов в задаваемом количестве «Количество Агентов на старте».

9. $F \rightarrow L = L - L * (xF + xf)$. {Переход на п. 12.}

Перед циклом происходит проверка на то, есть ли живые Агенты или нет.

10. $L > 0$. {Если «ДА», то переход на п. 13, если «НЕТ», то переход на п. 2.}

11. $L > 0$. {Если «ДА», то переход на п. 14, если «НЕТ», то переход на п. 2.}

12. $L > 0$. {Если «ДА», то переход на п. 15, если «НЕТ», то переход на п. 2.}

Если живых Агентов нет, то программа завершается, выводя окончательный результат за все итерации циклов, если нет – продолжается выполнение программы.

13. Fz – количество циклов. {Переход на п. 13.}

14. fz – количество циклов. {Переход на п. 14.}

15. z – количество циклов. {Переход на п. 15.}

После новых сигналов происходит дополнительная проверка Агентов на выживаемость. Если есть живые Агенты, то цикл повторяется до тех пор, пока не останется ни одного живого Агента или же не дойдет до установленного максимального количества циклов.

16. $FZ \geq FZn$ (где Zn – количество повторов $xf \rightarrow F$ до запоминания ассоциации ($F \rightarrow f = E$), E – эффектор). {Если «ДА», то переход на п. 22, если «НЕТ», то переход на п. 19.}

Эффектор получает сигналы с временными метками. Каждый полученный сигнал запоминается как последний.

17. $fZ \geq fZn$. {Если «ДА», то переход на п. 23, если «НЕТ», то переход на п. 20.}

18. $Z \geq Zn$. {Если «ДА», то переход на п. 24, если «НЕТ», то переход на п. 21.}

Если полученный сигнал – F , а последний полученный (перед этим) – f , то сравниваются временные метки сигналов. Если они отличаются меньше, чем на «Допустимая погрешность прогноза», то Агент получает L в задаваемом размере.

19. $L > 0$. {Если «ДА», то переход на п. 3, если «НЕТ», то переход на п. 2.}

20. $L > 0$. {Если «ДА», то переход на п. 4, если «НЕТ», то переход на п. 2.}

21. $L > 0$. {Если «ДА», то переход на п. 5, если «НЕТ», то переход на п. 2.}

22. $L = L - L * xF$. {Переход на п. 25.}

23. $L = L - L * xf$. {Переход на п. 26.}

24. $L = kL$. Срабатывание Э (где k – соотношение количества ассоциированных и неассоции-

рованных F и f , R – коэффициент умножения N при $F \rightarrow f = E$ {Переход на п. 27.}

25. $L > 0$. {Если «ДА», то переход на п. 2, если «НЕТ», то переход на п. 3.}

26. $L > 0$. {Если «ДА», то переход на п. 2, если «НЕТ», то переход на п. 4.}

27. $L > zL$. {Если «ДА», то переход на п. 28, если «НЕТ», то переход на п. 5.}

По ходу выполнения алгоритма программой каждый сигнал отправляется одновременно всем Агентам. Затем следует обсчет реакции Агента. Если по завершении суммарная энергия L Агента оказалась равна 0 или меньше, Агент деактивируется, если же больше 0, то это означает, что Агент после пройденного сигнала выжил.

28. $pf \rightarrow F = pfn \rightarrow F$. ($pfn \rightarrow Fn$ – вероятность ассоциации сигнала – f и сигнала F [ассоциированного и неассоциированного сигналов]). {Переход на п. 6.}

Если после прохождения сигналов Агент выжил, то ему в память записывается данная ассоциация причинно-следственной связи.

Программная реализация алгоритма позволила при интуитивном подборе параметров получить системы, обладающие способностью сохранения своих параметров любое заданное количество циклов взаимодействия со средой (рис. 2).

Для визуализации результатов программы на данном этапе был выбран линейный график – это простейший способ визуализации данных. И у такого подхода к отображению показателей есть много полезных качеств.

Данный график состоит из трех показателей:

1. Максимальная продолжительность жизни.
2. Средняя продолжительность жизни.
3. Количество живых Агентов.

Как видно из графика, отбор агентов средой уменьшает численность популяции и, соответственно, средняя и максимальная продолжительность жизни увеличиваются.

Сигнал f приходит перед сигналом F и дает Агенту возможность избежать большей потери негэнтропии. Кроме того, на графике можно заметить, что средняя продолжительность жизни и максимальная продолжительность жизни имеют разные тенденции изменения во времени. Средняя продолжительность жизни имеет более плавный характер изменения, тогда как максимальная продолжительность жизни имеет более резкие скачки. Это может быть связано с тем, что некоторые Агенты имеют особенности вероятностных значений параметров, которые позволяют им жить дольше.

Для ускорения анализа особенностей алгоритма Агента был сделан переход к моделированию их популяции. На графиках представлены только данные об одной популяции Агентов. Результаты могут отличаться в зависимости от заданных параметров среды и Агента. Поэтому для более точного предсказания динамики популяции проводились эксперименты с различными значениями параметров.

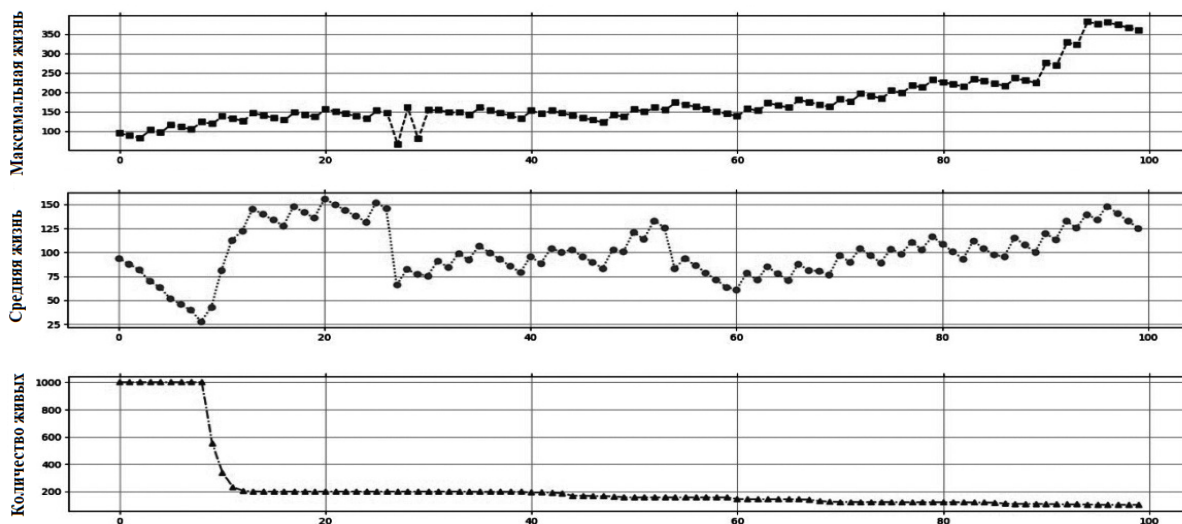


Рис. 2. Пример динамики параметров группы Агентов, взаимодействующих со средой

В целом, линейный график позволяет наглядно отобразить зависимость между различными показателями и выявить закономерности в изменении этих показателей со временем. Однако для более полного и точного анализа данных, возможно, потребуется использование других типов графиков и методов статистического анализа.

Заключение

Опираясь на модель биоагента, основанную на таких физических представлениях и учитывая преемственность, эмерджентность организации биологических систем, в дальнейшем представляется возможным попытаться моделировать их эволюцию, наращивая сложность до пределов аппаратных ограничений.

Финансовая поддержка: грант № 122010800028-4 (ЕГИСУ).

Литература

1. Анохин П.К. Основные вопросы теории функциональных систем. Философские аспекты теории функциональных систем. М. : Наука. 1978. С. 49–106.

2. Anokhin P.K. Anticipatory reflection of reality. *Vopr. Philosophy*. 1962. № 6. P. 97–109.

3. Собрание сочинений И.М. Сеченова. М. : МГУ. 1907. 732 с.

4. Tsitlovsky L. Consciousness, endogenous generation of goals and homeostasis // *International Journal of General Systems*. 2015. 44(6):655–666.

5. Schrödinger E. What is life? The physical aspect of the living cell. // Cambridge : University Press. 1944. 214.

6. Kitano H. Systems biology: A brief overview // *Science*. 2002. 295(5560):1662–1664.

7. Krushinsky A. Payment for solving the problem: biophysical prerequisites and possible evolutionary consequences. // *Russian Journal of Cognitive Science*. 2015. 2(1):231–237.

8. Ratushnyak A.S., Zapara T.A., Proskura A.L., Sklyarov A.N., Sorokoumov E.D. Analysis of appearances, formation and evolution of biological functional systems // *Studies in computational intelligence*. 2022. 1064:231–237.

9. Kitano H. Systems biology: A brief overview // *Science*. 2002. 295(5560):1662–1664.

Межполушарные различия в ЭЭГ у доношенных и поздних недоношенных новорожденных в первые дни постнатальной жизни

А.Е. Руннова, О.С. Панина, М.А. Симонян

Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского;
a.e.runnova@gmail.com

Сегодня проблема исследования сна человека стоит в ряду наиболее важных тем, объединяющих нейрочеловеков, физиологов, физиков и специалистов в области информационных технологий [1–5]. Такой интерес к данной проблеме связан с тем, что ранняя диагностика и лечение нарушений сна у пациентов позволяет побороть болезни, приводящие к неврологическим нарушениям [3, 4], а также значительно улучшить качество жизни пациентов. Одним из основных инструментов для диагностики нарушения сна является полисомнография [5]. Анализ результатов полисомнографии позволяет определить стадии сна и их длительность, а также изучить корреляционные соглашения динамики различных физиологических показателей со стадиями сна. Благодаря точному определению механизма нарушений сна удается объективно подобрать наиболее успешный способ лечения и предупредить дальнейшее неблагоприятное течение заболевания [4].

В то же время, несмотря на до сих пор не окончательно найденные решения всех загадок сна взрослых людей, особое внимание и интерес ученых привлекает изучение функционирования головного мозга в самом начале онтогенеза, иными словами, в первые дни жизни новорожденных. С учетом слабой развитости отклика сенсорных систем в этот период, особо важным становится анализ структуры активности головного мозга при переходе от сна к бодрствованию и изменение объективных характеристик головного мозга при этом. Наиболее часто в качестве характеристики мозговой активности используется сигнал электроэнцефалографии (ЭЭГ), что связано с дешевизной и простотой реализации данного вида записи. Анализ вариаций сигнала ЭЭГ также помогает в расшифровке вариаций процессов развития мозга у новорожденных, включая рожденных ранее обычного срока. Такой интерес вызван отнюдь не только фундаментальным интересом к проблеме развития человеческого мозга, но и сугубо гуманистическими задачами раннего клинического выявления риска травм головного мозга и соответствующего проведения ранних лечебных мероприятий для снижения неврологических дисфункций. Количественная оценка состояния головного мозга может максимизировать полезность существующих технологий мониторинга в отделении интенсивной терапии новорожденных (ОИТН). Большой междисциплинарный интерес к этой научной области подчеркивает потенциал количественного подхода для улучшения клинических исходов для детей [6–9].

Данная работа посвящена изучению появления и первичной динамики маркеров глубокого сна у детей первой недели жизни различного срока гестации, с точки зрения классического частотно-временного анализа. Кроме того, рассматривается вопрос о возможности создания системы единой объективной детекции и оценки качества сна новорожденных детей на основе автоматического анализа ЭЭГ.

Таблица 1

Оценки средней энергии колебательных режимов в частотных диапазонах $\Delta\delta$, $\Delta\theta$, $\Delta\alpha$, $\Delta\beta 1$, $\Delta\beta 2$, $\Delta\gamma$ для пространственных зон скальпа правой и левой височной, затылочной зон, а также правого и левого полушарий

Зона	Обозначение	Каналы ЭЭГ
Правая височная	E_{Δ} / r_{tl}	F7, f3, t3
Левая височная	E_{Δ} / l_{tl}	F8, f4, t4
Затылочная	E_{Δ} / o_l	P3, pz, p4, o1, oz, o2
Правое полушарие	E_{Δ} / r_{th}	Fp1, f7, f3, t3, c3, t5, p3, o1
Левое полушарие	E_{Δ} / l_{th}	Fp2, f8, f4, t4, c4, t6, p4, o2

Сбор экспериментальных данных был осуществлен в рамках клинического исследования, которое выполнялось на базе ФГБОУ ВО Саратовского государственного медицинского университета им. В.И. Разумовского Минздрава России и было одобрено локальным Комитетом по этике. В данное исследование вошли 98 доношенных и поздних недоношенных новорожденных со сроком гестации более 34 недель. Для всех новорожденных масса тела при рождении превышала 1,5 кг, родители добровольно подписывали информированное согласие на участие в исследовании. По каждому новорожденному ребенку предоставлялась информация, полученная специалистом-неонатологом при непосредственном осмотре новорожденного и регистрации основных физических данных пациента (срок гестации, масса и рост при рождении). Все новорожденные были разделены на группы I и II в соответствии со сроком гестации: 38 – 41 и 34 – 36 недель соответственно. Каждый ребенок из группы I дважды прошел неинвазивную и безболезненную процедуру функционального мониторинга через 8 часов и на 10-е сутки после рождения. Новорожденные из группы II проходили аналогичный мониторинг только на 10-е сутки после рождения. При проведении мониторинга ребенок располагался в кроватке. Данные многоканального поверхностного мониторинга биомедицинских сигналов (ЭЭГ, ЭОГ,

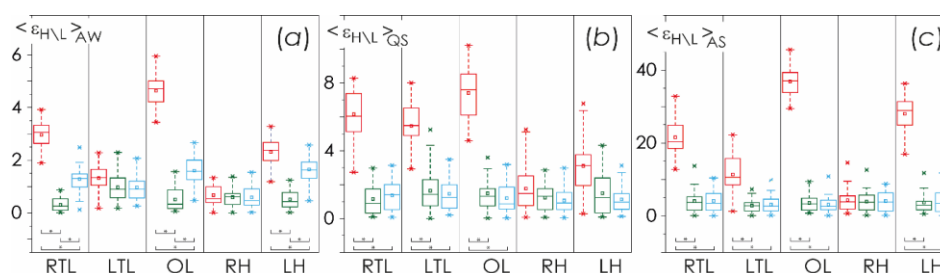


Рис. 1. Распределения усредненных значений отношения интегральной энергии в высоком частотном диапазоне к низкочастотному для каждой рассматриваемой зоны, рассчитанные при физиологических состояниях: AW (a), QS (b) AS (c). Сокращенные обозначения зон в соответствии с таблицей 1 приводятся под каждой диаграммой. Красным цветом показаны оценки для группы II, зеленым и синим – оценки первого и второго мониторинга группы I соответственно

ЭКГ, ЭМГ левая рука, ЭМГ правая нога) регистрировались с помощью электроэнцефалографа «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (ООО «Медиком МТД», Россия). ЭЭГ были записаны с частотой дискретизации 250 Гц с использованием обычного монополярного метода регистрации с двумя реперными точками и N = 20 электродов, расположенных по схеме «10–20» [10, 11]. Для регистрации сигналов использовались электроды Ag/AgCl в предварительно смонтированных головных установках. Два референтных электрода, A1 и A2, располагались на сосцевидных отростках, а заземляющий электрод N располагался надо лбом. Сигналы ЭЭГ фильтровались полосовым фильтром с точками отсечки 1,5 Гц и 40 Гц режекторным фильтром 50 Гц. Все записи были дополнены протоколом врача-исследователя, в котором подробно описано состояние ребенка – визуально и на базе «ручного» анализа показателей сердцебиения и др. определялись три типа состояния: состояния бодрствования (AW), активного сна (AS), глубокого сна (QS) [12].

Для изучения частотно-временных характеристик ЭЭГ было использовано классическое непрерывное вейвлетное преобразование, позволяющее оценить динамику мощности колебательной активности в различных частотных интервалах с хорошим временным разрешением [13].

Частотно-временные характеристики оценивались в традиционных частотных диапазонах, а именно дельта, тета, альфа, бета1, бета2, гамма, определяемых согласно принятым сегодня нейрофизиологическим представлениям [14]. При этом многоканальные записи ЭЭГ были разделены на несколько зон согласно таблице 1. На рис. 1 представлены результаты оценки усредненных значений соотношений интегральных амплитуд быстрых и медленных колебательных режимов. Физиологическое состояние бодрствования позволяет различить детей всех трех подгрупп за исключением усреднений по зонам LTL и RH. В то же время в состоянии сна достоверно различить разницу возраста в 10 дней у доношенных детей не представляется возможным. Интересно, что при отношении «слабому» усреднению (до полушарий) удается видеть достоверную статистическую разницу этих же детей с детьми, рожденными немного ранее 40 недель, для состояния QS, а для

состояния AS – эта разница сохраняется даже при усреднении по всему левому полушарию.

Таким образом, анализ активности ЭЭГ слабо недоношенных детей демонстрирует, что колебательная активность их головного мозга в целом более амплитудна и существенно отличается по уровню активности в различных частотных диапазонах от таковой у доношенных новорожденных (как в период после рождения, так и после десятидневной адаптации). Данные результаты хорошо согласуются с работами [15, 16], также показывающими, что период постнатального развития значительно влияет на динамику характеристик головного мозга. Результаты исследования заставляют предположить, что активно ведущиеся сегодня разработки автоматических систем распознавания сна новорожденных [17, 18] на основе анализа электрической активности головного мозга должны учитывать существенный уровень разброса объективных показателей активности головного мозга даже для достаточно узких по физикальным параметрам отбора групп доношенных детей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-22-00517).

Литература

1. *Massimini M. et al.* The sleep slow oscillation as a traveling wave // *Journal of Neuroscience*. 2004. V. 24, №. 31. P. 6862–6870.
2. *Gabdrakipova A.A., Chervatyuk M.I., Mishchenko A.N.* Sleep as a marker of health // *Eur. Res*. 2017. V. 30. P. 1–22.
3. *Loddo G. et al.* The treatment of sleep disorders in Parkinson's disease: from research to clinical practice // *Frontiers in neurology*. 2017. V. 8. P. 42.
4. *Zhuravlev M. et al.* Compensatory mechanisms of reduced interhemispheric EEG connectivity during sleep in patients with apnea // *Scientific Reports*. 2023. V. 13, №. 1. P. 8444.
5. *Šušmáková K., Krakovská A.* Discrimination ability of individual measures used in sleep stages classification // *Artificial intelligence in medicine*. 2008. V. 44, №. 3. P. 261–277.
6. *Pichler G., Schmölzer G. M., Urlesberger B.* Cerebral tissue oxygenation during immediate neonatal transition and resuscitation // *Frontiers in pediatrics*. 2017. V. 5. P. 29.
7. *Plomgaard A. M. et al.* Early biomarkers of brain injury and cerebral hypo- and hyperoxia in the SafeBoosC II trial // *PLoS One*. 2017. V. 12, №. 3. P. e0173440.

8. *Kenosi M. et al.* Monitoring cerebral oxygenation of preterm infants using a neonatal specific sensor // *Journal of Perinatology*. 2018. V. 38, № 3. P. 264–270.
9. *Pavlidis E., Lloyd R. O., Boylan G. B.* EEG-a valuable biomarker of brain injury in preterm infants // *Developmental neuroscience*. 2017. V. 39, № 1-4. P. 23–35.
10. World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects // *JAMA*. 2000. N 284. P. 3043
11. *Jurcak V., Tsuzuki D., Dan I.* 10/20, 10/10, and 10/5 systems revisited: their validity as relative head-surface-based positioning systems // *Neuroimage*. 2007. V. 34, № 4. P. 1600–1611.
12. *Lloyd R. O. et al.* Predicting 2-y outcome in preterm infants using early multimodal physiological monitoring // *Pediatric research*. 2016. V. 80, № 3. P. 382–388.
13. *Hramov A. E. et al.* *Wavelets in neuroscience*. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015.
14. *Garcia-Losarcos N., Vuppala A., Loparo K.* Continuous eeg monitoring and quantitative eeg techniques // *Neurocritical Care Informatics: Translating Raw Data into Bedside Action*. 2020. P. 79–109.
15. *Takeuchi A. et al.* Case Report: High-gamma oscillations on an ictal electroencephalogram in a newborn patient with hypoxic–ischemic encephalopathy // *Frontiers in Pediatrics*. 2021. V. 9. P. 679771.
16. *O'Toole J. M. et al.* Temporal evolution of quantitative EEG within 3 days of birth in early preterm infants // *Scientific Reports*. 2019. V. 9, № 1. P. 4859.
17. *Uchitel J., Vanhatalo S., Austin T.* Early development of sleep and brain functional connectivity in term-born and preterm infants // *Pediatric Research*. 2022. V. 91, № 4. P. 771–786.
18. *Tokariev A. et al.* Large-scale brain modes reorganize between infant sleep states and carry prognostic information for preterms // *Nature communications*. 2019. V. 10, № 1. P. 2619.

Этапы и нейронные закономерности приобретения инструментальных навыков у человека и других животных

О.Е. Сварник

Институт психологии РАН, Москва, svarnikoe@ipran.ru

Исследование закономерностей обучения уже давно демонстрирует существенную вариативность скорости освоения разных задач. Можно предположить, что такая вариативность обеспечивается особенностями процессов, происходящих в мозге. Многократно было показано, что испытуемые, различающиеся по успешности реализации проблемных задач, демонстрируют достоверно разные паттерны активности мозга. Хотя точные сценарии процессов, способствующих быстрому приобретению новых навыков, остаются неизвестными, в настоящее время можно говорить о разного рода нейронных коррелятах успешности научения.

Поскольку любое научение начинается с детекции новизны или рассогласования (Александров, 2005), можно предположить, что в основе быстрого и успешного приобретения навыков лежат особенности активации нейронов при возникновении новой ситуации или рассогласования имеющегося опыта с текущим опытом на начальных этапах научения. Известно, что маркером процессов детекции новизны является индукция экспрессии белка Fos в нейронных группах (Анохин, 1997). В ряде исследований была найдена прямая корреляция между интенсивностью экспрессии Fos и успешностью научения (например, Zhang et al., 2000; Bertaina-Anglade et al., 2000; McCabe & Horn, 1994; Radulovic et al., 1998).

Повышение частоты активности нейронов при обучении отмечалось неоднократно. Так, например, было показано, что при выработке условного оборонительного рефлекса у кроликов фоновая частота проекционных нейронов соматосенсорной коры увеличивается с обучением (Швырков, 1969). Также на кроликах было показано, что при формировании условного мигательного рефлекса на звук самые ранние стадии обучения (первый день, когда процент правильных реакций начинает расти) характеризуются самой высокой частотой активности нейронов области CA1 гиппокампа по сравнению с последующими днями (McEchron, Disterhoft, 1997). Похожие результаты были получены при регистрации нейронной активности в гиппокампе в период формирования навыка навигации в лабиринте у крыс. Было установлено, что в целом частота активности популяции клеток области CA1 и число активных нейронов снижается, когда обстановка становится знакомой и успешность решений задачи навигации увеличивается (Karlsson, Frank, 2008). Таким образом, можно предположить, что активность нейронов изменяется на самых ранних стадиях обучения,

при введении новизны или несоответствия ожидаемого с реальной ситуацией, по сравнению с ситуацией выполнения устоявшегося навыка.

Интересные данные были получены при введении апамина – полипептида, с одной стороны, блокирующего кальций-активируемые калиевые каналы малой проводимости (SK-каналы), что приводит к большей возбудимости нейронов за счет модуляции гиперполяризации после генерации потенциала действия (Stackman et al., 2002), а с другой стороны, улучшающего научение и память (Heurteaux et al., 1993). Было, например, установлено, что введение апамина приводит к достоверному снижению времени приобретения навыка нажатия на педаль у мышей (Messier et al., 1991). Кроме того, было показано *in vitro*, что введение апамина интенсифицирует развитие долговременной потенциации в гиппокампе (Behnisch & Reumann, 1998). Таким образом, можно предположить, что увеличение частоты активности нейронов – одно из необходимых условий увеличения скорости обучения. Увеличение частоты активности нейронов должно приводить к увеличению вариативности и сложности активности нейронных групп, что может проявляться, например, в увеличении показателя интегрированной информации (Нажесткин, Сварник, 2023).

Таким образом, можно предположить, что успешное обучение сопровождается следующим сценарием. Увеличение частоты активности нейронов приводит к возникновению большего числа взаимодействий между нейронами. Большая частота генерации потенциалов действия может отражать большее число неожиданных для нейрона взаимодействий с другими нейронами. Это приводит к формированию более сложных групп, что позднее отражается в большем числе контактов (для отдельно взятого нейрона) и большему числу нейронов, меняющих экспрессию своих генов (маркируемых по транскрипционному фактору Fos). Большое число тестируемых взаимодействий приводит к увеличению скорости нахождения необходимых комбинаций нейронов, способствующих достижению нужного результата целого организма. При этом увеличение частоты нейронов, имеющих специфические активации по отношению к уже существующим элементам опыта, является необходимым условием для «вписывания» приобретаемого нового элемента опыта в уже существующую структуру опыта. Индивидуальные различия в скорости приобретения новых навыков могут, таким образом, зависеть от реактиваций уже существующего у индивида опыта.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки № 0138-2023-0002.

Литература

1. Александров Ю.И. Научение и память: традиционный и системный подходы // Журнал высшей нервной деятельности. 2005. Т. 55, № 6. С. 842–860.
2. Анохин К.В. Молекулярные сценарии консолидации долговременной памяти // Журнал высшей нервной деятельности. 1997. Т. 47(2). С. 261–279.
3. Нажесткин И.А., Сварник О.Е. Теория интегрированной информации и её применение к анализу нейронной активности головного мозга // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2023. Т. 31, № 2. С. 180–201.
4. Швырков В.Б. Сравнительная характеристика опережающего и безусловного возбуждений в соматосензорной коре кролика при выработке условного оборонительного рефлекса // Журнал высшей нервной деятельности. 1969. Т. 19, № 1. С. 3–9.
5. Behnisch T., Reymann K.G. Inhibition of apamin-sensitive calcium dependent potassium channels facilitate the induction of long-term potentiation in the CA1 region of rat hippocampus in vitro // Neurosci Lett. 1998. 253(2):91–4.
6. Bertaina-Anglade V., Tramu G., Destrade C. Differential learning-stage dependent patterns of c-Fos protein expression in brain regions during the acquisition and memory consolidation of an operant task in mice // Eur. J. Neurosci. 2000. V. 12. P. 3803–3812.
7. Heurteaux C., Messier C., Destrade C. & Lazdunski M. Memory processing and apamin induce immediate early gene expression in mouse brain. Mol. Brain Res. 1993. 3. 17–22.
8. Karlsson M.P., Frank L.M. Network Dynamics Underlying the Formation of Sparse, Informative Representations in the Hippocampus // The Journal of Neuroscience. 2008. V. 28 (52). P. 14271–14281.
9. McCabe B. J., Horn G. Learning-related changes in Fos-like immunoreactivity in the chick forebrain after imprinting // PNAS. 1994. V. 91. P. 11417–11421.
10. McEchron M.D., Disterhoft J.F. Sequence of single neuron changes in CA1 hippocampus of rabbits during acquisition of trace eyeblink conditioned responses // J. Neurophysiol. 1997. V. 78 (2). P. 1030–1044.
11. Messier C., Mourre C., Bontempi B., Sif J., Lazdunski M., Destrade C. Effect of apamin, a toxin that inhibits Ca(2+)-dependent K+ channels, on learning and memory processes // Brain Res. 1991. 551(1–2):322–6.
12. Radulovic J., Kammermeier J., Spiess J. Relationship between Fos production and classical fear conditioning: effects of novelty, latent inhibition and unconditioned stimulus preexposure // J. Neurosci. 1998. V. 18. P. 7452–7461.
13. Stackman R.W., Hammond R.S., Linardatos E., Gerlach A., Maylie J., Adelman J.P., Tzounopoulos T. Small conductance Ca2+-activated K+ channels modulate synaptic plasticity and memory encoding // J. Neurosci. 2002. 22:10163–10171.
14. Zhang Y.-Q., Ji Y.-P. & Mei J. Behavioral training-induced c-Fos expression in the rat nucleus basalis of Meynert during aging // Brain Research. 2000. 879. 156–162.

Применение рекуррентного анализа для распознавания стадий быстрого и медленного сна

А.О. Сельский¹, М.В. Агальцов^{1,2}, Е.П. Емельянова¹

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского; selskii@yandex.ru

² Национальный медицинский исследовательский центр терапии и профилактической медицины, Москва; meretari@yandex.ru

При исследовании сна большую роль играет вопрос распознавания стадий сна [1]. Обычно разметку осуществляют специалисты, однако это длительный и утомительный процесс, поэтому все большую актуальность приобретают различные методы автоматической разметки стадий сна [2]. В настоящей статье описан метод такой разметки, основанный на анализе рекуррентных показателей. Рекуррентный анализ, применяемый в данном исследовании, представляется хорошим методом для работы с длительными ночными записями, так как сам метод прост в реализации и не требует большого числа сложных вычислений [3].

Для верификации метода, чтобы иметь уверенность в правильности работы для пациентов с различными нарушениями, метод применялся к трем группам испытуемых. Первую группу формируют условно здоровые испытуемые, вторую – пациенты с болезнью Паркинсона, третью – с синдромом апноэ. Все полисомнографические записи испытуемых были ранее размечены на стадии сна профессиональными сомнологами, а полученные гипнограммы (графическое представление разметки стадий сна) [4] в дальнейшем использовались в работе для оценки точности метода. В данной статье полисомнографические записи включали электрокардиограмму (ЭКГ), сигналы функции дыхания, окулографию (ОКГ), электромиограмму (ЭМГ) и шесть сигналов электроэнцефалограммы (ЭЭГ). В ходе работы были отдельно рассмотрены только ЭЭГ-сигналы. Сигналы ЭЭГ регистрировали в 6 стандартных отведениях по схеме 10 20 [5]. Использовались следующие каналы: O1, O2, C3, C4, Fp1, Fp2.

Рекуррентный анализ нашел применение в широком диапазоне задач обработки сложных сигналов различной природы [6]. Сам алгоритм расчета отличается простотой [7], что делает его перспективным для работы с большими данными и обработкой сигналов в реальном времени. Рассмотрим сигнал $x(t)$, значения которого известны в моменты времени t_i , где $i = 1, \dots, n$. Для него можно построить рекуррентную матрицу по следующему правилу:

$$R_{i,j} = \theta(\varepsilon - |x(t_i) - x(t_j)|), \quad (1)$$

где $R_{i,j}$ – элемент рекуррентной матрицы для сигнала x , t_i и t_j моменты времени t , ε – эмпирически определенное пороговое значение, обеспечивающее необходимую точность метода, $\theta(\dots)$ – функция Хевисайда, которая принимает нулевое значение для отрицательных аргументов и единичное для неотрицательных. Таким образом, если в момент времени t_j сигнал вернулся в ε окрестность

значения сигнала в момент времени t_i , то в рекуррентной матрице будет 1.

Для оценки количества повторов в сигнале используется рекуррентный показатель, являющийся суммой всех ненулевых значений рекуррентной матрицы, нормированной на ее размер [8]. Такой показатель может быть рассчитан для каждого анализируемого сигнала x по всей длине временного ряда или по небольшому временному фрагменту. Из-за очень большого объема данных в сигналах полисомнографии рекуррентный показатель стоит рассчитывать для относительно небольших фрагментов в скользящем временном окне. Такой подход в целом совпадает с методологией определения стадий сна сомнологами [9, 10].

Любой сон начинается со стадии бодрствования, характеризующейся прежде всего альфа-волнами. Если активность альфа-ритма занимает более 50% эпохи (временного интервала в 30 секунд), то эту эпоху называют состоянием бодрствования. Наибольшая мощность альфа-ритма наблюдается в затылочных отведениях (O1, O2). Первая стадия (N1 медленного сна) характеризуется уменьшением амплитуды волн и появлением визуально выраженного тета-ритма, наблюдаемого во всех отведениях примерно одинаково. Второй этап (N2) начинается с появления К-комплексов и характерных веретен сна. Третья стадия (N3) сна характеризуется мощной медленноволновой активностью и развитием выраженных дельта-волн. Кроме того, иногда выделяют четвертую стадию сна, характеризующуюся дальнейшим увеличением амплитуды дельта-активности, которая лучше всего визуализируется в лобных отведениях (Fp1, Fp2). Третью и четвертую стадии сна принято рассматривать как единый блок. Быстрый сон характеризуется низкоамплитудной смешанной частотой без К-комплексов и сонных веретен, низким мышечным тонусом подбородка (ЭМГ подбородка образует изолинию) с одновременными быстрыми движениями глазных яблок и так называемой зеркальной волной на ЭОГ.

Первым этапом обработки данных стало построение статистических закономерностей для рекуррентных показателей по стадиям сна. На рис. 1 приведены такие закономерности по всем испытуемым. Так как в среднем за ночь рекуррентный показатель у испытуемых мог сильно варьироваться, для общей оценки на рисунке строились рекуррентные показатели, нормированные на средний за всю ночную запись показатель.

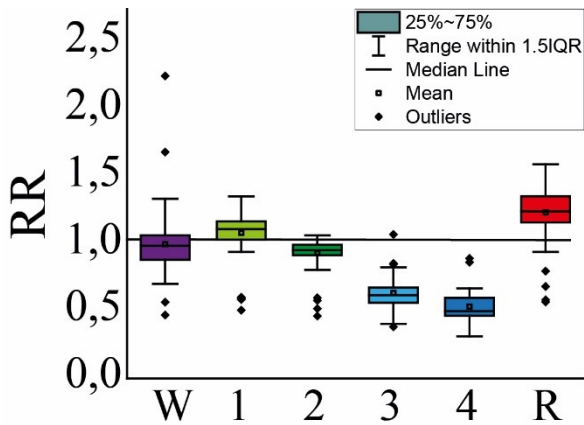


Рис. 1. Статистические закономерности испытуемых для различных стадий сна

Результаты показывают, что статистически рекуррентные показатели для бодрствования/пробуждения и 1-й и 2-й стадий сна примерно идентичны. В то же время рекуррентные показатели более медленных 3-й и 4-й стадий сна демонстрируют уменьшение, а стадия быстрого REM-сна, напротив, увеличение показателя.

Следуя этому, был предложен следующий метод распознавания стадий сна. Если рекуррентный показатель становится больше первого порогового значения (рассчитанного относительно максимального и минимального значений показателя за ночь), то мы отмечаем стадию REM-сна. Если показатель ниже 2-го порогового значения, то отмечается стадия сна 3–4. Если показатель находится между пороговыми значениями, то мы говорим о 1–2-й стадиях сна. Графически метод вместе с гипнограммой представлен на рис. 2.

Значения средней точности метода для различных групп испытуемых приняли следующий вид: 72.46% для условно здоровых испытуемых, 67.81% для пациентов с болезнью Паркинсона и 77.902% для пациентов с апноэ. Результаты по точности не являются идеальными, но демонстрируют хороший потенциал для последующей модификации данного метода. Особенно с учетом его простоты и быстрого действия.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована возможность создания эффективного метода автоматического распознавания стадий сна, основанного на рекуррентном анализе. Метод отличается высоким быстрым действием, что важно для объемных ночных записей, и позволяет в будущем создать метод, работающий в реальном времени. Точность метода в основном превышает 70%, что является хорошим результатом, однако для пациентов с болезнью Паркинсона результат хуже. Это объясняется неустойчивостью рекуррентного показателя для данной группы испытуемых. Еще одним минусом метода является то, что в таком виде он исключает маркирование случаев пробуждения.

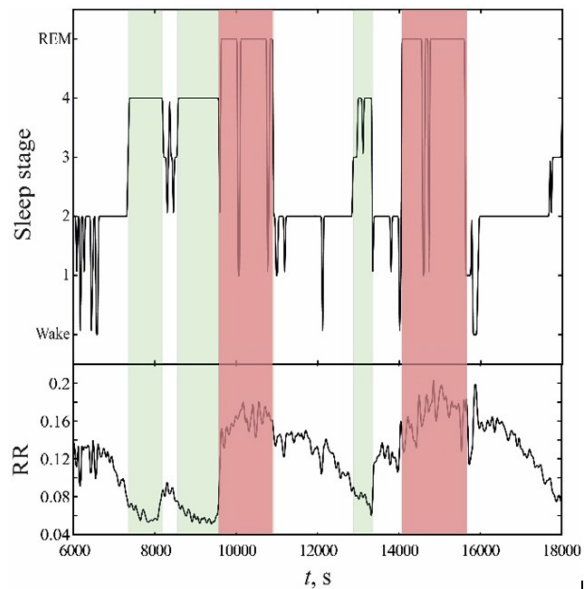


Рис. 2. Гипнограмма для одного из испытуемых, на которой показаны случаи пробуждения, стадии быстрого сна и четыре стадии медленного сна. Ниже приведены значения рекуррентного показателя, рассчитанные в соответствующих временных окнах. Серым цветом выделены 3 и 4-я стадии сна, темно-серым – стадии быстрого сна

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-72-10061.

Литература

1. Mikkelsen K.B., Villadsen D.B., Otto M., Kidmose P. Automatic sleep staging using ear-EEG // Biomedical engineering online. 2017. V. 16, № 1. P. 111.
2. Ebrahimi F., Alizadeh I. Automatic sleep staging by cardiorespiratory signals: a systematic review // Sleep & breathing. 2002. V. 26, № 2. P. 965-981.
3. Parro V. C., Valdo L. Sleep-wake detection using recurrence quantification analysis // Chaos. 2018. V. 28, № 8. P. 085706.
4. Domingues A., Paiva T., Sanches J. M. Hypnogram and sleep parameter computation from activity and cardiovascular data // IEEE transactions on bio-medical engineering. 2014. V. 61, № 6. P. 1711–1719.
5. Rojas G. M. et. al. Study of Resting-State Functional Connectivity Networks Using EEG Electrodes Position As Seed // Frontiers in neuroscience. 2018. V. 12. P. 235.
6. Acharya U. R. et. al. Application of recurrence quantification analysis for the automated identification of epileptic EEG signals // International journal of neural systems. 2011. V. 21, № 3. P. 199-211.
7. Eckmann J.-P., Kamphorst S. O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems // Europhysics Letters. 1987. V. 4, № 9. P. 973.
8. Ramos A. M. T. et. al. Recurrence measure of conditional dependence and applications // Physical review. 2017. V. 95, № 5–1. P. 052206.
9. Altini M., Kinnunen H. The Promise of Sleep: A Multi-Sensor Approach for Accurate Sleep Stage Detection Using the Oura Ring // Sensors. 2021. V. 21, № 13. P. 4302.
10. Mitsukura Y., Fukunaga K., Yasui M., Mimura M. Sleep stage detection using only heart rate // Health informatics journal. 2020. V. 26, № 1. P. 376–387.

Ультразвуковая вокализация лабораторных крыс как новый источник информации для экспериментатора

Е. Ситникова

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, eu.sitnikova@ihna.ru

Многие позвоночные используют акустический канал для передачи видоспецифической информации, в частности [1]:

- об идентичности (индивидуальной или групповой);
- о групповом статусе или настроении (доминирование, покорность, страх или агрессия);
- о намерении и вероятном поведении (приближение, бегство, игра, ухаживание или агрессия);
- об условиях окружающей среды (наличие хищников или местонахождение пищи).

Частотно-временные свойства акустических сигналов несут информационную нагрузку, то есть «информационно-значимые параметры» сигналов. Каждый вид животных издает акустические сигналы, которые совместимы с их слуховыми способностями. Большинство мелких грызунов, включая лабораторных крыс и мышей, издают ультразвуковые вокализации с частотой выше 20 кГц.

Ультразвуковая вокализация у крыс

Ультразвуковая вокализация у крыс имеет несколько отличительных особенностей [1–3].

Во-первых, она не может быть услышана человеком без специальных устройств (ультразвуковые микрофоны). Многие исследователи, работающие с лабораторными грызунами, не придают значения тому, что их животные вокализируют.

Во-вторых, она несёт важную информацию о состоянии животного в контексте данного эксперимента. Например, в состоянии страха крысы вокализируют в низкочастотном ультразвуковом диапазоне (22–25 кГц), а в комфортном состоянии – в диапазоне 50–70 кГц (см. ниже).

В-третьих, она имеет важную социальную составляющую и используется крысами для передачи информации о своем местоположении, состоянии здоровья или для привлечения сородичей.

Таким образом, ультразвуковая вокализация является важным аспектом коммуникации у крыс и уникальной по сравнению с другими типами вокализации.

Ультразвуковые сигналы, издаваемые взрослыми крысами, отличаются от звуков, издаваемых детенышами. Подростки и взрослые крысы издают 2 основных типа ультразвуковых вокализаций, которые различаются по частоте (22–25 кГц и 50–70 кГц).

В процессе индивидуального развития крысят ультразвуковая вокализация появляется очень рано. Считается, что это рефлекторный ответ на воздействие холода при удалении от матери, вызванный повышением давления воздуха в грудной

клетке и сужением голосовых связок. Воздух, выходящий через узкое отверстие сомкнутых голосовых связок, создаёт высокий звук в ультразвуковом диапазоне. Крысята сохраняют данный способ вокализации в течение первых 20 дней жизни, вплоть до отлучения от матери. В этот период молодые крысята демонстрируют чрезвычайно богатый репертуар различных вокализаций – от слышимых человеком звуков до ультразвуковых частот с минимальной частотой 1,9 кГц и максимальной частотой 125 кГц [2].

Инфантильный паттерн вокализации крысят (при изоляции от матери) резко меняется после выхода из гнезда. Взрослые крысы способны издавать крики в слышимом диапазоне с частотой от 2 до 4 кГц и богатыми гармоническими компонентами. При прямом столкновении с хищником крысы могут издавать звуковые крики (визги) как предупредительный сигнал хищнику на близком расстоянии или как сигнал сородичам на большом расстоянии. Защитная вокализация угрозы (или гетероспецифическая коммуникация) усиливаются по мере приближения хищника. Считается, что таким образом хищник получает информацию о том, что крыса-мишень готова к защитной атаке.

Ультразвуковая вокализация используется крысами для общения на коротких расстояниях и исключительно с сородичами внутри социальной группы.

«22 кГц» вокализация

Вокализации, вызванные негативным контекстом или негативным эмоциональным состоянием крысы, обычно называемые «22 кГц сигналы» (*22 kHz calls*) [1–4]. Эти сигналы издаются в очень узком диапазоне частот от 18 до 32 кГц, при этом индивидуальные отличия по частоте составляют от 1 до 6 кГц, т. е. сигналы минимально модулированы по частоте. Данные ультразвуковые звуковые сигналы тревоги имеют очень простую форму (рис. 1, а) и состоят из повторяющихся серий импульсов одинаковой частоты, которые длятся от 300 до 4000 мс при уровне звукового давления от 65 до 85 дБ [1].

Эволюционно вполне обосновано, что вокализация в ультразвуковом диапазоне частот является эффективной адаптацией у крыс, которая сводит к минимуму опасность быть обнаруженными и атакованными хищниками. Однако крысам, живущим в подземных норах, нет необходимости общаться в ультразвуковом диапазоне, и они могли бы вернуться к обычному звуковому диапазону, используемому другими млекопитающими. Однако крысы этого не делают и сохраняют ультразвуковую форму общения под землей.

«50 кГц» вокализация

Вокализации, издаваемые в комфортной среде в ситуациях, вызывающих положительный эмоциональный отклик у крысы. Эти сигналы имеют частоту от 32 до 96 кГц (в среднем 50 кГц) и гораздо короче (от 30 до 50 мс), чем 22 кГц вокализации (рис. 1, б). Эти вокализации называют «щелбанием» (*chirps*) из-за их короткой продолжительности и сходства с чириканьем птиц при прослушивании с замедлением в 17 раз (прослушивание – один из доступных методов анализа ультразвука до появления цифровых преобразований сигналов).

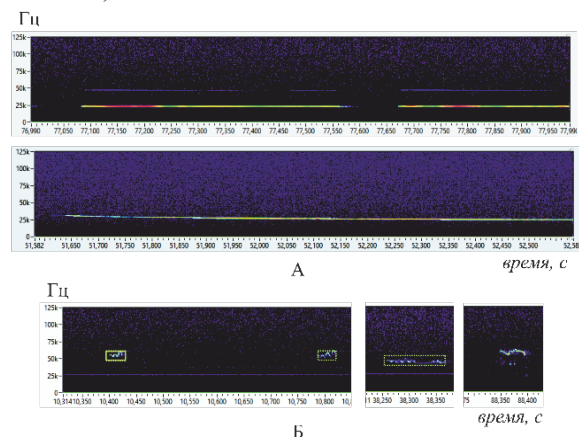


Рис. 1. Сонограммы ультразвуковых сигналов у взрослых крыс, записанные в процессе обучения с болевым подкреплением. А – характерные длительные сигналы тревоги в диапазоне 22–25 кГц. Б – короткие 50 кГц вокализации. Записи получены с помощью оборудования Metris Sonotrack 2.6.2.30

50 кГц вокализации могут являться сигналами контакта, направленными в сторону знакомых сородичей, даже если эти сородичи отсутствуют поблизости. Крысы будут издавать эти сигналы, когда обнаружат свежие обонятельные следы других крыс, и чем больше они обнаруживают запаховых следов, тем интенсивнее 50 кГц вокализации частотно-модулированного типа (рис. 1, б). Крысы могут издавать такие сигналы в одиночестве в клетке после отделения от других крыс.

Экспериментальное исследование ультразвуковой вокализации у крыс

Существует несколько вариантов записи ультразвука у лабораторных крыс в лабораторных ус-

ловиях. Мы используем оборудование фирмы Metris (Хофдорп, Нидерланды) Sonotrack версии 2.6.2.30. Система состоит из ультразвукового микрофона, блока управления и программного обеспечения. Конструкция микрофона и настройки программы обеспечивают подавление шума.

Мы исследовали стратегии поведения у взрослых самок и самцов в тесте активного избегания (всего 57 крыс: 30 самцов и 27 самок, средний возраст 8 месяцев). Крыс обучали избегать электрокожного раздражения электрическим током и параллельно регистрировали ультразвуковую вокализацию. Все самки были протестированы в фазу диэструса эстрального цикла.

Самцы демонстрировали значительно худшие результаты обучения избеганию, чем самки, и чаще демонстрировали пассивную стратегию замирания. Ультразвуковые сигналы тревоги с частотой 22–25 кГц были зарегистрированы у 25,9% самок (все они успешно выполнили тест) и у 50% самцов с разными стратегиями поведения. Плотность 22–25 кГц сигналов у самок в течение 10–20 мин теста избегания была значимо ниже, чем у самцов.

В целом интенсивную ультразвуковую вокализацию в диапазоне частот 22–25 кГц у самцов можно рассматривать как сигнал о негативном эмоциональном состоянии или о состоянии выученной беспомощности в экспериментальной ситуации, которой невозможно избежать.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 23-25-00166).

Литература

1. Portfor C.V. Types and Functions of Ultrasonic Vocalizations in Laboratory Rats and Mice // J. Am. Assoc. Lab. Anim. Sci. 2007. V. 46, № 1. P. 28–34.
2. Brudzynski S.M., Fletcher N.H. Rat Ultrasonic Vocalization: Short-Range Communication // Handbook of Mammalian Vocalization / Brudzynski S.M., Ed.; Elsevier B.V., 2010. P. 69–76. ISBN 978-0-12-374593-4.
3. Brudzynski S.M. Biological Functions of Rat Ultrasonic Vocalizations, Arousal Mechanisms, and Call Initiation // Brain Sci. 2021. V. 11. P. 605. DOI: 10.3390/brainsci11050605.
4. Brudzynski S.M. Communication of Adult Rats by Ultrasonic Vocalization: Biological, Sociobiological, and Neuroscience Approaches // ILAR J. 2009. V. 50. P. 43–50. DOI: 10.1093/ilar.50.1.43.

Использование эмпирических моделей с радиальными базисными функциями для выявления связей между полушариями мозга при распространяющейся депрессии

Е.А. Созонов¹, И.В. Сысоев^{1,2}, Е.М. Сулейманова², Л.В. Виноградова²

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

²Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

Распространяющаяся депрессия (РД) представляет собой процесс кратковременной распространяющейся волны резкой клеточной деполяризации [1]. В настоящее время данное явление активно изучается в нейрофизиологии, нейропсихологии и неврологии. Результаты исследования потенциально могут объяснить или дать информацию как о различных патологических состояниях, среди которых эпилепсия, так и о принципах работы головного мозга в целом. Сама РД является достаточно яркой и хорошо воспроизводимой реакцией серого вещества центральной нервной системы. РД хорошо детектируется на записях электроэнцефалограмм (рис. 1). Она возникает в различных критических состояниях, среди которых повреждение головного мозга, приступах мигрени, долговременного отсутствия подачи кислорода.

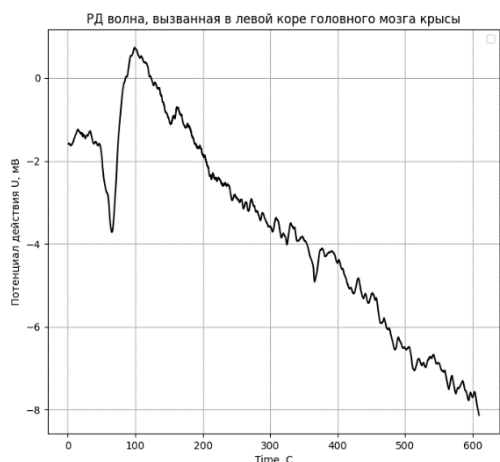


Рис. 1. Низкочастотная составляющая сигнала электроэнцефалограммы крысы. Участок 0-100 секунд – РД-волна, вызванная в левой коре головного мозга крысы

Предполагается что односторонняя РД-волна способна менять функциональные взаимодействия в коре головного мозга [7]. Для проверки этой гипотезы в данной работе было исследовано влияние РД-волны на функциональную связь межполушарных областей коры у крыс.

Для подобного анализа существует достаточно большое число алгоритмов, среди которых: методы нелинейной причинности по Грейнджеру [4], методы оценки взаимной информации [2], метод энтропии переноса [3]. Данные методики находят частое применение на практике, однако в данной работе предлагается использовать так называемый метод ядерной причинности по Грейнджеру [6], в котором в качестве модели ис-

пользуется линейная комбинация радиальных базисных функций, значение которых зависит от расстояния точки до центра выбранной функции:

$$\varphi(x) = \varphi(x - c), \quad (1)$$

$$y(x) = \sum_i^{k-1} w_i \varphi_i(x), \quad (2)$$

где k – количество радиальных базисных функций, c – выбранный центр радиальной базисной функции, w_i – вес функции, φ – радиальная базисная функция.

Использование радиальных базисных функций для анализа связанности применительно к биопотенциалам, в том числе для временных рядов, полученных с помощью электроэнцефалографии, впервые было предложено в работах Даниэля Маринацо [5]. Обучение моделей на их основе можно проводить двумя путями. Первый вариант подразумевает подбор только коэффициента w и установку остальных параметров в качестве констант. Вторым способом подразумевает оптимизацию трех параметров, C , σ , w , для достижения оптимальной точности. В данном случае подбор параметров производился вторым способом. Так же одной из особенностей радиальных базисных функций является необходимость для каждого типа данных подбирать функцию, которая даст достаточную точность моделирования. В настоящей работе в качестве радиальной базисной функции была выбрана функция Гаусса:

$$\varphi(x) = e^{-(x-c)^2/2\sigma^2}, \quad (3)$$

где σ определяет радиус радиальной базисной функции.

Основная идея метода причинности по Грейнджеру состоит в том, что если система $\{X_n\}_{n-1}^N$ влияет на систему $\{Y_n\}_{n-1}^N$, то добавление элементов первой в прогностическую модель второй ведет к уменьшению неопределенности, то есть к падению ошибки ε_{cup} в сравнении с ε_{solo} . В качестве меры оценки качества модели используется среднеквадратичная ошибка прогноза:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - X_{true})^2}{n-1}}, \quad (4)$$

для количественной оценки уровня связанности вводится показатель улучшения прогноза PI :

$$PI = 1 - \frac{\varepsilon_{cup}^2}{\varepsilon_{solo}^2}, \quad (5)$$

если $PI \rightarrow 1$, то делается вывод о наличии влияния системы X на Y , если $PI \rightarrow 0$, то делается вывод об отсутствии влияния. Из-за невозможности построить численную модель идеально описывающую исследуемую систему данный показатель

никогда не достигает предельных значений и находится в промежутке от 0 до 1.

Цель настоящей работы – исследование изменения уровня функциональной связанности между полушариями головного мозга во время, до и после прохождения РД, вызванной искусственным повреждением коры головного мозга крысы.

Электрофизиологический эксперимент проводили на самцах крыс линии Wistar, возрастом 6–7 месяцев, полученных из питомника «Столбовая» (Московская область). Исследования проводились в соответствии с нормами Европейского сообщества, разработанными для экспериментов на животных, и были одобрены этической комиссией Института ВНД и НФ РАН по экспериментам над животными (протокол № 1 от 01.02.2022).

Все эксперименты велись на бодрствующих свободно подвижных животных с предварительно имплантированными регистрирующими электродами и направляющей канюлей для проведения фокального микроповреждения нервной ткани и индукции РД. В работе были рассмотрены экспериментальные 10-минутные записи сигналов локальных потенциалов мозга 10 взрослых самцов. Крысу помещали в экранированную экспериментальную камеру. После 5-минутного периода адаптации к экспериментальной обстановке проводили регистрацию фоновой активности моторной коры в течение 10 мин, а затем с помощью микроповреждения фронтальной коры индуцировали одну волну РД. Для каждой крысы проводилось 2–3 повторных эксперимента с перерывом несколько дней.

Полученные временные ряды, содержащие электрическую наводку и ярко выраженный тренд (рис. 1) перед анализом подвергались предварительной обработке путем полосовой фильтрации на частотах 50 Гц и 100+ Гц, вычитания низкочастотной составляющей и выборочным удалением артефактов, вызванных выходом сигнала за динамический диапазон АЦП (модель E14-440, L-Card, Россия). В ходе удаления низкочастотной составляющей из сигнала также вычиталась РД-волна, что можно видеть на рис. 1, далее анализ проводился на обработанном сигнале с использованием метода ядерной причинности по Грейнджеру.

Для построения прогностической модели были выбраны следующие гиперпараметры:

- число РБФ $N = 10$;
- дальность прогноза $t = 100$;
- лаг модели $l = 1$.

Подбор расположения центров C радиальных базисных функций осуществлялся методом C -средних. Подбор параметра w весов функций осуществлялся методом наименьших квадратов. Радиус центра σ брался как половина расстояния до ближайшей РБФ-соседа. Дальнейшее уточнение коэффициентов производилось методом градиентного спуска. Расчет PI производился с использованием 20-секундных неперекрывающихся окон на 10-минутных записях электроэнцефалограмм 10 крыс.

Для анализа результатов формируется следующая гипотеза: для рассмотренных интервалов эмпирическое среднее является математическим ожиданием выборки значений оценки ($N = 10$) ядерной причинности по Грейнджеру. Вероятность того, что каждое значение из выборки будет меньше, чем среднее – $1/2$. Вероятность того, что 10 значений будут меньше – $(1/2)^{10}$. Такой уровень значимости зовется поточечным и требует корректировки из-за множественного тестирования: в данном случае проводится 30 последовательных независимых измерений. Применяя поправку Бонферрони, напрямую получим уровень значимости $(\frac{30}{2})^{10} \approx 0,03$ что является достаточно высоким значением (свидетельствует о низкой вероятности ошибки).

На рис. 2 начиная с 90 с для зеленой линии, обозначающей действие неповрежденной части на поврежденную часть, как минимум 5 точек находятся выше фонового значения, однако статистически значимых точек всего 3, что говорит о наличии статистически значимого повышения уровня направленной связанности от целого полушария к поврежденному. В случае с красной линией, показывающей значение уровня PI в направлении от поврежденной коры к средней, статистически значимые точки отсутствуют.

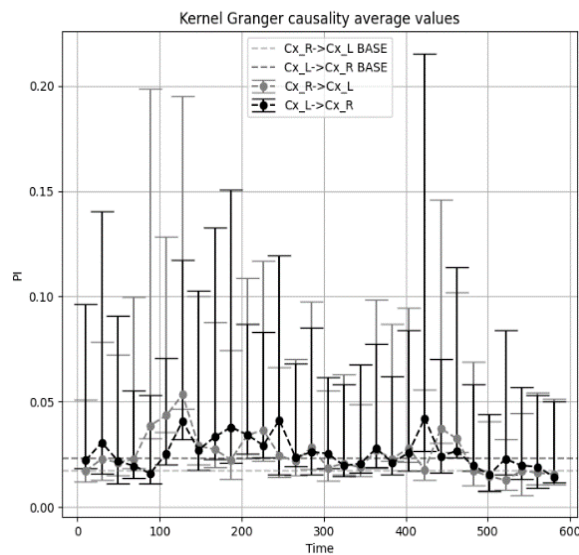


Рис. 2. Усреднение PI по 10 записям, содержащим волну РД. Errorbars – минимальные и максимальные значения PI в соответствующих окнах. Пунктирными горизонтальными линиями изображены усредненные значения, соответствующие фону представленной меры

Спустя примерно 100 секунд уровень PI спадает до фонового уровня. В связи с этим можно сделать вывод, что прохождение РД-волны влияет на уровень функциональной связанности между полушариями головного мозга. В частности, метод ядерной причинности по Грейнджеру показывает явный рост уровня связанности в направлении от здорового полушария к поврежденному и отсутствие значимого роста в обратном направлении.

Данная работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-15-00327.

Литература

1. *Koroleva, V. I.* Reduced incidence of cortical spreading depression in the course of pentylenetetrazol kindling in rats / V. I. Koroleva, L. V. Vinogradova, J. Bures // *Brain Research*. 1993. V. 608, №. 1. P. 107–114.

2. *Kraskov, A.* Estimating mutual information / A. Kraskov, H. Stögbauer, P. Grassberger // *Physical review E*. 2004. V. 69, №. 6. P. 066138.

3. *Hahs, D. W.* Transfer entropy for coupled autoregressive processes / D. W. Hahs, S. D. Pethel // *Entropy*. 2013. V. 15, №. 3. P. 767–788.

4. *Kornilov M.V. et.al.* Choosing the optimal model parameters for Granger causality in application to time series with main timescale // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2016. V. 82. P. 11–21.

5. *Marinazzo D., Pellicoro M., and Stramaglia S. Sebastiano.* Nonlinear parametric model for Granger causality of time series // *Phys. Rev. E*. 2006. Vol. 73. 066216.

6. *Granger CWJ.* Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-Spectral Methods // *Econometrica*. 1969. V.37(3). P.424-438.

7. *Лачинова Д. А., Сысоев И. В., Сулейманова Е. М., Виноградова Л. В.* // Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2023 : материалы XXX Всероссийской научной конференции. Вып. 30. Саратов : Саратовский госуд. ун-т им. Н.Г. Чернышевского, 2023. С. 105–106.

Когнитивные модели восприятия и их реализация на нейроморфных сетях

Л.А. Станкевич¹, А.М. Корсаков², Д.А. Беркман¹

¹ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого,
Stankevich_lev@inbox.ru

² Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург

В настоящее время к искусственному интеллекту сформировался новый подход, который предполагает использование результатов когнитивной науки, в частности, психологических и нейрофизиологических принципов функционирования нервной системы и когнитивных методов обработки информации в процессе мыслительной и познавательной деятельности человека [1, 7]. Такой подход привел к разработке интеллектуальных систем с элементами когнитивности, которые стали называть искусственными когнитивными системами (далее – когнитивными системами).

Когнитивная система должна быть способна познавать свое окружение, т. е. формировать и накапливать знания о нем в процессе функционирования и, используя эти знания, адаптироваться к нему или изменять его в соответствии с заложенной в систему целью [4, 7].

Когнитивные функции моделируют простые ментальные операции мыслительного процесса. Можно выделить когнитивные функции, являющиеся элементами процессов восприятия и преобразования информации.

Когнитивные системы основаны на когнитивных моделях и методах [7]. *Когнитивные модели* имеют корни в когнитивной психологии [1]. В техническом плане эти модели – формализованное представление процессов памяти, восприятия и поведения с использованием когнитивных функций, реализующих эти процессы [5, 7].

Результаты современных исследований по нейрофизиологии легли в основу разработки *ассоциативных когнитивных моделей*, в которых знания представляются сетевыми отображениями, формируемыми путем настройки весов связей между узлами сетей, а при решении задач используется ассоциативный вывод [5–7].

В системах, формирующих сложное поведение, целесообразно использовать когнитивные модели восприятия и формирования поведений, функционально подобно тому, как это делается в нервной системе человека. Важную роль при этом имеют *когнитивные модели восприятия*, конечным результатом которых является классификация объектов и выделенных фрагментов сцен [7].

В этой работе обсуждается когнитивная модель восприятия зрительной информации и ее реализация на нейроморфных сетях, а также построение на ее основе классификатора пространственно-временных паттернов.

Далее в статье обсуждается ассоциативное представление знаний в когнитивной модели, описываются средства реализации когнитивных функций, приводится пример решения задачи

классификации вызванных потенциалов мозга по электроэнцефалографической информации, регистрируемой в двух отведениях зоны мозга.

Ассоциативное представление знаний в когнитивной модели восприятия

Рассмотрим принципы построения ассоциативных когнитивных моделей и соответствующие им методы представления, формирования и использования знаний [7].

Ассоциативные когнитивные модели используют представление знаний в форме ассоциативных отображений когнитивных функций, а также методы их обработки и ассоциативного вывода. Реализация таких моделей может осуществляться с помощью сетевых вычислителей.

Ассоциативное отображение – отображение многомерной зависимости, связывающей входной набор параметров с выходным набором, с помощью сетевой структуры. Ассоциативное отображение может быть представлено набором

$$AM = \{X, Y, S, U, F\}. \quad (1)$$

Здесь X, Y – множества входных и выходных параметров; S, U – множества структур и составляющих их узловых элементов соответственно; F – множество функций, реализуемых в элементах.

Преобразование образов – ассоциативное отображение (трансформация) одного образа в другой. Возможно единичное или множественное ассоциативное отображение. Единичное отображение связывает входной P_x и выходной P_y образы, представленные, например, в матричном виде:

$$SAM = AM(X=P_x, Y=P_y). \quad (2)$$

Множественное ассоциативное отображение может быть представлено как набор одиночных отображений, привязанных к моментам времени:

$$MAM = \{SAM_t, t=1, \dots, T\}. \quad (3)$$

Здесь SAM_t – одиночное ассоциативное отображение для t -го момента времени протекания процесса, длительность которого равна T .

Ассоциативный вывод – процедура принятия решений путем реализации последовательно-параллельных цепочек ассоциативных отображений, предварительно настроенных на представление набора связанных между собой зависимостей.

Когнитивные модели восприятия, как правило, включают когнитивные функции, выполняющие анализ наблюдаемой информации и классификации. При восприятии пространственно-временной информации анализируется одновременно несколько каналов, в которых информация может быть коррелированной.

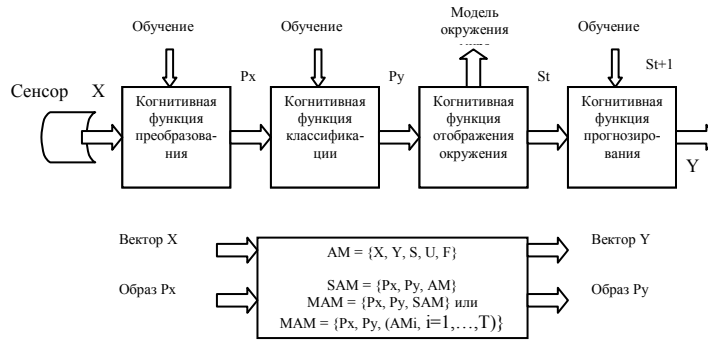


Рис. 1. Восприятие зрительной информации

На рис. 1 показан набор когнитивных функций, определяющих процесс восприятия зрительной информации. Эти функции формируются в процессе обучения. Здесь дополнительно введено обозначение S_t – ситуация, т. е. динамический набор состояний, определяющий операцию наблюдаемого процесса; показано, что когнитивная модель восприятия зрительной информации может быть реализована несколькими модулями. Основным является модуль, реализующий когнитивную функцию классификации образов. Этот модуль получает информацию от модуля, реализующего когнитивную функцию преобразования, которая формирует импульсные последовательности, кодирующие признаки образов по информации, поступающей на входы модуля классификации. Результат работы модуля классификации, в свою очередь, используются модулем, реализующим когнитивную функцию отображения окружения, которая формирует модель окружения, кодирующую текущую ситуацию, в которой указываются распознанные объекты и их локализация. Обычно в модели окружения сохраняются ситуации в предыдущие моменты времени, чтобы можно было решать с помощью когнитивной функции прогнозирования, как будет развиваться модель окружения со временем. В нижней части рис. 1 показано, что преобразование функций и образов производится через ассоциативные отображения в соответствии с выражениями (1)–(3).

Нейроморфная реализация когнитивной функции классификации

Когнитивные функции могут быть реализованы на нейроморфных сетях, компонентами которых являются спайковые (импульсные) нейроны.

Рассмотрим реализацию когнитивной функции классификации на нейроморфной сети, компонентами которой являются спайковые нейроны, основанные на модели Ижикевича [8]. Модель Ижикевича с параметрами, полученными путем подгонки динамики инициации спайка, описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} v' = 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I_{syn} \\ u' = a(bv - u) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{if } v \geq v_{peak}: \begin{cases} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d \end{cases}$$

Параметр a определяет время восстановления переменной u , параметр b – чувствительность переменной восстановления u к подпороговым

колебаниям мембранного потенциала v , параметр c – значение сброса мембранного потенциала v после спайка, параметр d – сброс переменной восстановления u .

В настоящей работе, с целью увеличения времени восстановления мембранного потенциала v после входного воздействия, в стандартную формулу классической модели добавлялась мембранная емкость C :

$$\begin{cases} v' = \frac{0.04v^2 + 5v + 140 - u + I_{syn}}{C} \\ u' = a(bv - u) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{if } v \geq v_{peak}: \begin{cases} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d \end{cases}$$

При моделировании сети из нейронов Ижикевича в настоящей работе рассматривались два отдельных типа нейрона – возбуждающие и тормозящие (рис. 2). Это обусловлено необходимостью учитывать возможность некоторых входных данных и весов принимать отрицательные значения. Таким образом, модифицированная модель нейрона Ижикевича получила возможность динамически менять свой тип нейрона с возбуждающего на тормозящий или наоборот при изменении знака синаптического тока, подаваемого на него в конкретный момент времени. Необходимо отметить, что возбуждающие и тормозные нейроны модифицированной модели Ижикевича отличались между собой только применявшимися параметрами модели.

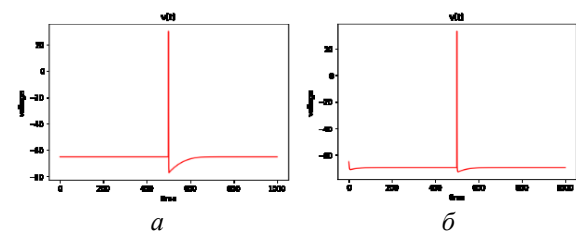


Рис. 2. Изменение мембранного потенциала нейрона Ижикевича при единичном воздействии: a – возбуждающий нейрон, b – тормозящий нейрон

На рис. 3 изображен вариант структуры классификатора на нейроморфной сети со спайковыми нейронами. Сеть имеет два входа, один скрытый слой из 4 нейронов и один выходной нейрон, разделяющий пространство признаков на 2 класса. Импульсные потоки на выходе классификатора далее преобразовывались в размеченную модель образов, которая может быть использована для

решения прикладной задачи, например, формирования команд управления каким-либо объектом.

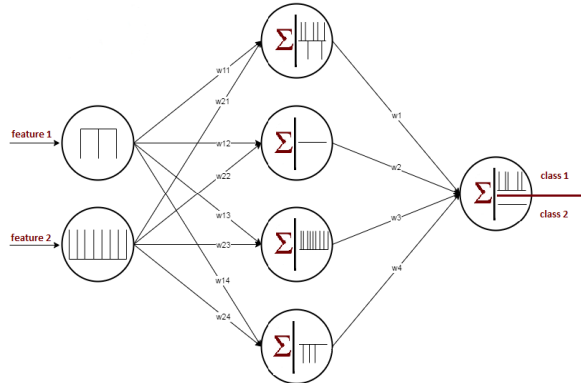


Рис. 3. Общая схема сети классификатора из модифицированных нейронов Ижикевича

Для преобразования непрерывных входных данных feature 1 и feature 2 в частоту использовалось соотношение

$$y_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} * F. \quad (6)$$

В результате такого преобразования входные данные распределялись в диапазоне от $-F$ до F . Отрицательная частота интерпретировалась как последовательность отрицательных входных спайков, поступающих с частотой, равной своему модулю.

Таким образом, в процессе решения задачи классификации на вход каждого j -го скрытого нейрона подавался синаптический ток:

$$I_{syn_j}(t) = \sum_{i=1}^{N_{inp}} w_{ij} I_{inp_i}(t), \quad (7)$$

где w_{ij} – веса обученной сети, соответствующие связям между i -м входным нейроном и j -м скрытым, N_{inp} – количество входных нейронов, $I_{inp_i}(t)$ – массив из значений входного тока I_0 при отсутствии входного воздействия, где I_0 определено как

$$I_0 = -(0.04c^2 + 5c + 140 - bc), \quad (8)$$

либо I_1 при его наличии, где I_1 определено как

$$I_1 = (v_{peak} + |c| + I_0) * C * red. \quad (9)$$

В модифицированной модели был введен понижающий коэффициент $red < 1$, применяющийся к значению входного тока, соответствующему срабатыванию нейрона с целью уменьшения вклада отдельных входных воздействий на мембранный потенциал. Этот коэффициент позволяет подавать ток на мембрану маленькими порциями, делая модель менее восприимчивой к единичным входным воздействиям. На рис. 2 показан эффект от появления новых постоянных C и red при единичном входном воздействии. На выходном нейроне, по аналогии со скрытыми нейронами, на вход подавался синаптический ток:

$$I_{syn}(t) = \sum_{i=1}^{N_h} w_i I_{inp_i}(t), \quad (10)$$

где w_i – веса обученной сети, соответствующие связям между i -м скрытым нейроном и выходным,

N_h – количество скрытых нейронов, $I_{inp_i}(t)$ – массив из значений входного тока I_0 при отсутствии входного воздействия, либо I_1 при его наличии.

Отрицательному спайку соответствовала ситуация, когда синаптический ток, подаваемый на мембрану нейрона, принимал отрицательное значение. На отрицательный спайк реагировал нейрон с параметрами тормозящего. Положительному спайку соответствовала ситуация, когда синаптический ток, подаваемый на мембрану нейрона, принимал положительное значение. На положительный спайк реагировал нейрон с параметрами возбуждающего. На выходе модели происходила классификация по срабатыванию (class 1) или не срабатыванию (class 2) выходного нейрона.

Пример применения когнитивной модели зрительного восприятия

В последнее время большое внимание уделяется разработке интерфейсов «мозг-компьютер» (ИМК), в которых требуется распознавать пространственно-временные паттерны по сигналам биоэлектрической активности мозга [2, 3].

Рассмотрим следующую модель восприятия. Человек смотрит на экран монитора и ожидает появления целевого стимула. Когда он появляется, мозг через зрительную систему воспринимает его и генерирует в ответ волну вызванного потенциала P300. ИМК регистрирует ЭЭГ-сигналы, анализирует их на компьютере и классифицирует ЭЭГ-паттерны появления или отсутствия целевых стимулов. Так можно моделировать когнитивную функцию классификации с элементом внимания. Этот подход можно использовать в системе классификации воображаемых команд человека.

Эксперимент. Для проведения эксперимента были взяты параметры модели: $v_{peak} = 30$, $C = 100$, $red = 0.2$, $F = 25$, $x_{min} = 0$, $x_{max} = 120$. Для возбуждающего нейрона были выбраны параметры: $a = 0.02$, $b = 0.2$, $c = -65$, $d = 8$, а для тормозного нейрона – параметры: $a = 0.02$, $b = 0.25$, $c = -65$, $d = 2$.

Данные с пробами ЭЭГ регистрировались простым прибором Muse с 4 электродами. Для проверки корректности работы нейроморфного классификатора были отобраны данные с 2 электродов (ТР9 и ТР10), на которых лучше отображалась волна P300 при предъявлении стимулов в виде вертикальных (целевые стимулы) и горизонтальных (нецелевые стимулы) белых полос в темном круге. В пробах ЭЭГ, длительностью 800 мс, для каждого электрода вручную выбраны окна размером 200 мс, разделяющиеся на 10 признаков посредством выбора медианного значения на каждом промежутке в 20 мс. Тем самым получалось 20 признаков для одного примера. Обучающая выборка включала 10 примеров, имеющих по 20 признаков. На рис. 4 показаны образцы выделенных отрезков ЭЭГ в обучающих примерах.

Для обучения нейроморфного классификатора со структурой, представленной на рис. 3, был ис-

пользован персептрон, подобный ему по структуре, который обучался на тех же данных. Полученные наборы весов связей были перенесены на нейроморфный классификатор, который работал с импульсными потоками на входах и генерировал результирующий импульсный поток на выходе.

В персептроне классификация происходила по формуле

$$\begin{aligned} & \text{if } out \geq 0.5: 1 \\ & \text{else: } 0, \# \end{aligned} \quad (11)$$

где $out = \sigma_{out}$ – значение на выходном нейроне.

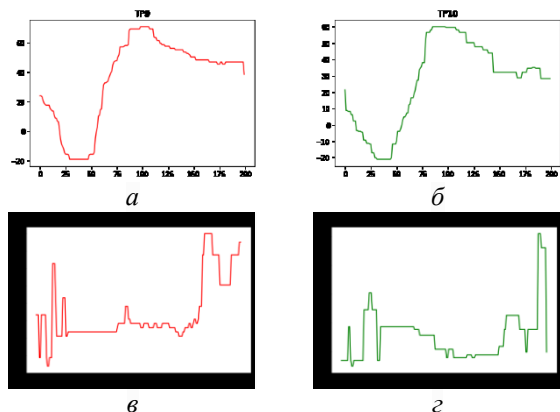


Рис. 4. Обучающие примеры: *a, б* – обучающий пример, где есть сигнал P300; *в, г* – обучающий пример, где нет сигнала P300

В нейроморфном варианте классификация происходила по критерию срабатывания или не срабатывания выходного нейрона. Если нейрон сработал хотя бы один раз – пример относился к классу 1 (есть сигнал P300), если не сработал ни разу – к классу 0 (нет сигнала P300).

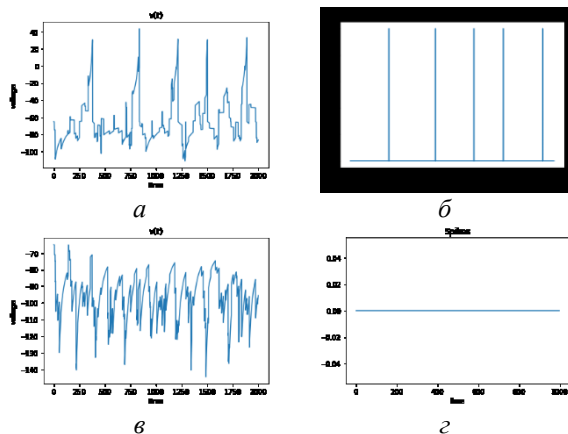


Рис. 5. Примеры выходных нейронов: *a, б* – пример правильного срабатывания; *в, г* – пример правильного несрабатывания (*a, в* – напряжения на мембране, *б, г* – спайки на выходе)

Проведено сравнение результатов классификации с помощью персептрона и нейроморфной сети с весами, полученными при обучении этого персептрона, которое показало, что они соответствуют друг другу на 100% при данных параметрах модели и весах, полученных при обучении. Таким образом, в результате эксперимента было показано, что нейроморфный классификатор мо-

жет быть обучен на модели персептрона с аналогичной структурой. На рис. 5 показаны примеры сигналов на выходах нейроморфного классификатора при правильном (есть волна P300) и неправильном (нет волны P300) срабатывании.

В эксперименте была достигнута точность классификации по двум классам ЭЭГ-паттернов – присутствия или отсутствия волны P300 – 95%.

Заключение

В работе обсуждается когнитивная модель восприятия зрительной информации. Рассмотрены ассоциативные средства реализации когнитивной модели. Показана целесообразность реализации модели на нейроморфных сетях, построенных на модифицированных нейронах Ижикевича. Рассмотрен пример построения и применения нейроморфной сети для решения задачи классификации вызванных потенциалов (волны P300), возникающих в мозгу человека как реакции на целевые стимулы, появляющиеся на мониторе.

В результате проведенного эксперимента было показано, что разработанный нейроморфный классификатор может быть обучен на модели персептрона с аналогичной структурой.

Достигнута точность классификации по двум классам ЭЭГ-паттернов – присутствия или отсутствия волны P300 – 95%, что позволяет использовать его, например, в системах бесконтактного управления роботизированными устройствами.

Исследование выполнено при помощи гранта Российского научного фонда № 23-21-00287, <https://rscf.ru/project/23-21-00287>.

Литература

1. Величковский Б.М. Когнитивная наука. Основы психологии познания : в 2-х томах. – М. : Академия, 2006.
2. Гунделак Ф.В., Станкевич Л.А., Сонькин К.М., Шемякина Н.В., Нагорнова Ж.В. Применение интерфейсов «мозг-компьютер» в ассистивных технологиях // Труды СПИИРАН. Том 19, № 2. СПб., 2020. С. 277–301.
3. Капралов Н.В., Нагорнова Н.В., Шемякина Ж.В. Методы классификации ЭЭГ-паттернов воображаемых движений // Информатика и автоматизация. 2021. 20, 94–132. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.1.4>.
4. Магазов С.С. Когнитивные процессы и модели. – М. : Издательство ЛКИ, 2007.
5. Станкевич Л.А. Когнитивные структуры и агенты в системах управления интеллектуальных роботов // Новости искусственного интеллекта. 2004. № 1. С. 41–55.
6. Станкевич Л.А. Когнитивный подход к управлению гуманоидными роботами // От моделей поведения к искусственному интеллекту. Серия «Науки об искусственном» / ред. В.Г. Редько. Издательство УРСС, 2006. Гл. 14, с. 386–443.
7. Станкевич Л.А. Когнитивные системы и роботы: монография. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 631 с.
8. Izhikevich E.M. Simple model of spiking neurons. IEEE Trans. Neural Net. 14, 1569–1572 (2003). <https://doi.org/10.1109/TNN.2003.820440>.

Универсальные механизмы переходной динамики в сетевых моделях таламокортикальной системы мозга

И.В. Сысоев^{1,2}, А.А. Капустников^{1,2}, М.В. Сысоева^{1,3}

¹ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

² Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

³ Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

Переходная колебательная динамика была многократно обнаружена в нейронных сетях из неосциллирующих элементов – моделей нейронов с параметрами, соответствующими режиму возбуждения, и с аттрактором в виде устойчивой точки [1–3]. Такие режимы с точки зрения биофизики и физиологии должны иметь большое значение по двум причинам. Во-первых, в большинстве случаев реальные нейроны сами по себе не генерируют колебаний, а только отвечают на внешний стимул. Во-вторых, большинство колебательных режимов мозга на самом деле нестационарны и существуют конечное время. Однако большинство нелинейных динамических моделей биофизики, в том числе моделей подсистем мозга по-прежнему рассматривают исключительно динамику на аттракторе, поскольку методика изучения переходных процессов в нелинейной динамике крайне неразвита. В подавляющем большинстве случаев переходный процесс стараются просто отбросить.

Известны два подхода к конструированию моделей динамических систем, для которых безаттракторная динамика является целевою. Во-первых, можно на основе теоретических представлений о желательном устройстве неустойчивых многообразий вручную сконструировать фазовое пространство [4, 5]. Такой подход хорош тем, что механизмы переходной динамики изначально понятны. Досадно то, что обычно есть априорные биофизические представления о том, как должна выглядеть динамическая система и с точки зрения уравнений для отдельных узлов, и с точки зрения архитектуры связей между ними. И этот известный из первых принципов вид либо не позволяет сконструировать фазовое пространство вручную, либо мы просто не понимаем, как это сделать. Поэтому основным остается эмпирический вычислительный подход, основанный на использовании известных моделей нейронов и синапсов, генерации случайных матриц связности (по физиологическим правилам) и отборе таких моделей/матриц, которые демонстрируют требуемое поведение.

Было высказано предположение, что при генерализованной эпилепсии только некоторая незначительная часть пораженной системы, в частности, таламокортикальной, ответственна за генерацию патологической динамики, в то время как другие ее области задействованы пассивно. Это означает, что существует «первичная эпилептическая сеть», из которой эпилептиформная активность благодаря связям распространяется на большое количество областей мозга [6]. Поэтому

моделирование этой фокальной области (или фокального контура) представляет первостепенный интерес.

При рассмотрении нейронных сетей мозга нередко прибегают к мезомасштабным моделям, в которых число модельных клеток велико, но существенно меньше реального. Это позволяет, с одной стороны, учесть эффекты распределенного взаимодействия клеток различных структур между собою и внутри каждой структуры, а с другой – получить модель, численное решение и исследование которой возможно за разумное ограниченное время.

Для таламокортикальной системы такие модели были представлены ранее для переходов между сном и бодрствованием [7, 8] и для моделирования эпилепсии [9].

В данной работе мы рассматриваем модели на основе 88 матриц связности, разработанных для таламокортикальной системы ранее [10] с использованием двух функций связи на i -й нейрон W_i – линейной

$$W_i(u) = \sum k_{i,j} u_j, \quad (1)$$

где $u = (u_1, u_2, \dots, u_D)$ – переменные модельных нейронов, ответственные за трансмембранный потенциал, $k_{i,j}$ – коэффициенты связи; и нелинейной сигмоидной

$$W_i(u) = \sum_{j=1, j \neq i}^D k_{i,j} \left(1 + \tanh\left(\frac{u_j}{v_0}\right) \right), \quad (2)$$

где v_0 – нормировочный коэффициент.

Все нейроны делились на 5 популяций и обозначались как: PY – пирамидальные нейроны коры (4 клетки), IN – интернейрон коры (1 клетка), RE – ретикулярные клетки таламуса (4 клетки), TC – таламокортикальные клетки (4 клетки), NT – нейрон, моделирующий тройничный нерв (1 клетка).

Мы рассмотрели три наиболее популярные модели спайковых нейронов для отдельных узлов сети: ФитцХью – Нагумо как в [10],

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{du_i}{dt} &= u_i - \frac{u_i^3}{3} - v_i + W_i(u), \\ \frac{dv_i}{dt} &= u_i + a_i - b_i v_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где параметры a_i и b_i подбираются так, чтобы отдельные нейроны находились в возбудимом режиме – все, кроме нейрона тройничного нерва; а также Моррис – Лекара и Ходжкина – Хаксли:

$$\begin{aligned}
C \frac{du_i}{dt} &= I_{ext} - g_L(u_i - u_L) - \\
&- g_{Ca} M_\infty(u_i)(u_i - u_{Ca}) - \\
&- g_K n_i(u_i - u_K) + W_i(u), \\
\frac{dn_i}{dt} &= \frac{n_\infty(u_i) - n_i}{\tau_n(u_i)},
\end{aligned} \quad (4)$$

где $C, g_{Ca}, u_{Ca}, u_K, g_K, I_{ext}$ – параметры, а $M_\infty(u_i), n_\infty(u_i)$ и $\tau_n(u_i)$ суть функции, описываемые уравнениями:

$$\begin{aligned}
M_\infty(u_i) &= 0.5 \left(1 + \tanh\left(\frac{u_i - v_1}{v_2}\right) \right), \\
n_\infty(u_i) &= 0.5 \left(1 + \tanh\left(\frac{u_i - v_3}{v_4}\right) \right), \\
\tau_n(u_i) &= \left(0.008 \cosh\left(\frac{u_i - v_3}{2v_4}\right) \right)^{-1}.
\end{aligned} \quad (5)$$

Система (4) – (5) интересна тем, что ее уравнения – размерные и содержат сложные нелинейности. Фактически это самая простая физиологически релевантная модель отдельного нейрона.

Модель Ходжкина – Хаксли – самая первая известная физиологически релевантная модель нейрона:

$$\begin{aligned}
C \frac{du_i}{dt} &= I_{ext} - g_K n_i^4(u_i - u_K) - \\
&- g_{Na} m_i^3 h_i(u_i - u_{Na}) - \\
&- g_L(u_i - u_L) + W_i(u), \\
\frac{dx_i}{dt} &= \alpha_x(u_i)(1 - x_i) - \beta_x(u_i)x_i,
\end{aligned} \quad (6)$$

где x_i – одна из трех активационных переменных для калиевых n_i и кальциевых m_i каналов, h_i – инактивационная переменная для кальциевых каналов. Функции α_x и β_x задаются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
\alpha_m(u_i) &= \frac{0.1(u_i - 25)}{1 - \exp[-(u_i - 25)/10]}, \\
\beta_m(u_i) &= 4 \exp(-u_i/18), \\
\alpha_h(u_i) &= 0.07 \exp(-u_i/20), \\
\beta_h(u_i) &= 1 + \exp[-(u_i - 30)/10], \\
\alpha_n(u_i) &= \frac{0.01(u_i - 10)}{1 - \exp[-(u_i - 10)/10]}, \\
\beta_n(u_i) &= 0.125 \exp(-u_i/80).
\end{aligned} \quad (7)$$

Далее для всех трех типов узлов для обоих типов связей (1) и (2) были исследованы модели с каждой из 88 матриц связанности (всего – 528 моделей). В них детектировалась бифуркация рождения цикла по параметру связи k (все $k_{i,j}$ полагались равными, кроме коэффициента, ответственного за возбуждение сети со стороны нейрона тройничного нерва), а затем вблизи этой бифуркации изучались переходные процессы, вызванные кратковременным воздействием со стороны тройничного нерва. При этом фаза воздействия варьировалась, и с помощью сечения Пуанкаре определялось число полноамплитудных колебаний после окончания воздействия. В первую очередь мы искали матрицы связей, использование которых со

всеми типами узлов и различными типами связей дает достаточно длинную переходную динамику. В качестве критерия достаточности мы выбрали 10 колебаний, так как у человека минимальная длительность полноценного приступа составляет около 3 с, а частота – примерно 3,5 Гц [11].

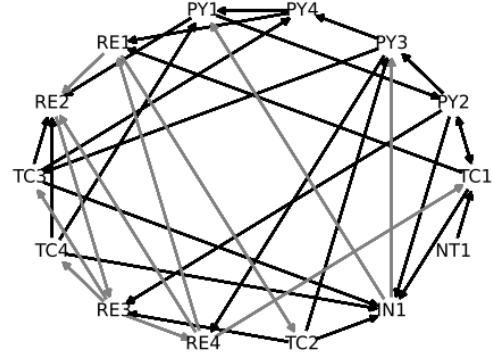


Рис. 1. Граф связи 14 нейронов для матрицы № 55 – одной из двух матриц связи, для которых длинные переходные процессы были обнаружены при обеих функциях связи и для всех трех типов узлов сети. Черным цветом обозначены положительные связи (для которых $k_{i,j} > 0$), серым – отрицательные ($k_{i,j} < 0$)

Оказалось, что в построенном нами в работе [10] классе из 88 матриц связанности для модели таламокортикальной системы есть 2 матрицы: № 55 (рис. 1) и № 57, при использовании которых в ансамблях со всеми тремя перечисленными типами узлов и обоими видами связей при определенных значениях коэффициента связи возникают достаточно длинные переходные процессы. Для линейных связей (1) пример таких процессов – рис. 2, для сигмоидных связей (2) – рис. 3.

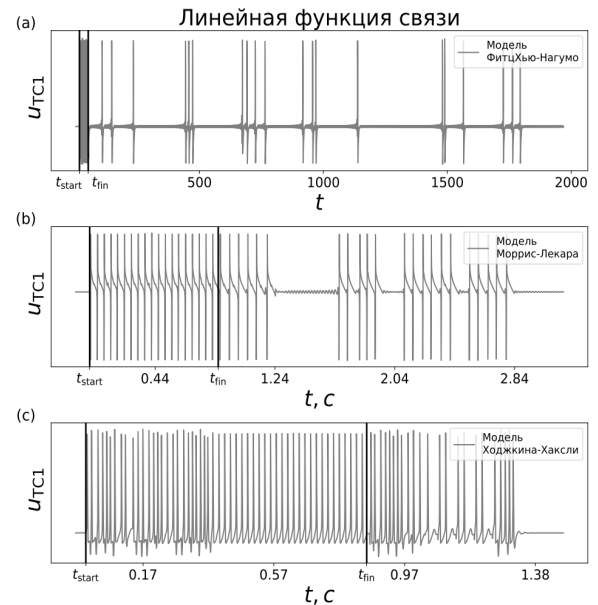


Рис. 2. Временные ряды нейрона TC1 с использованием одной и той же матрицы связанности и различных моделей для отдельного узла при использовании линейной функции связей (1). Фрагмент a построен для ансамбля осцилляторов ФитцХью – Нагумо (3), фрагмент b – осцилляторов Моррис – Лекара (4), (5), фрагмент c – осцилляторов Ходжкина – Хаксли (6), (7)

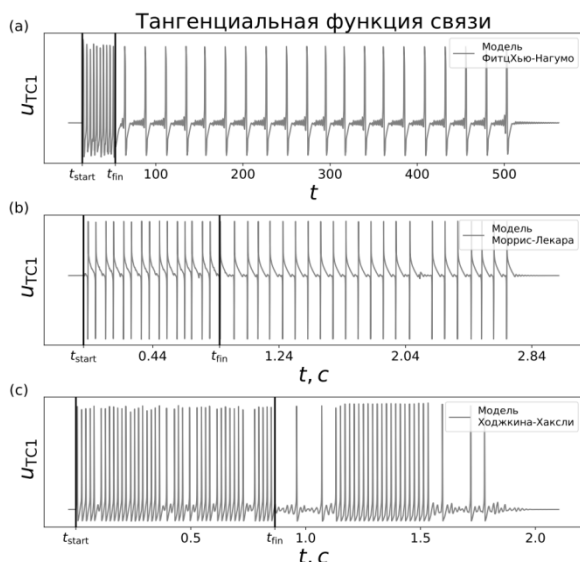


Рис. 3. Временные ряды нейрона TC1 с использованием одной и той же матрицы связности и различных моделей для отдельного узла при использовании линейной функции связей (1). Фрагмент *a* построен для ансамбля осцилляторов ФитцХью – Нагумо (3), фрагмент *b* – осцилляторов Моррис – Лекара (4), (5), фрагмент *c* – осцилляторов Ходжкина – Хаксли (6), (7)

Таким образом, нам удалось продемонстрировать универсальность переходной динамики в небольших сетях нейронов, моделирующих пиковолновые разряды при абсансной эпилепсии. Из-за размерности системы и того, что искомое поведение происходит не на аттракторе, ожидать, что аналогичные результаты могут быть получены аналитически, вероятно, не приходится.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-72-10030-П, <https://rscf.ru/project/19-72-10030/>.

Литература

1. *van Ooytjen A., van Pelt J., Corner M.A., Lopes da Silva F.H.* The emergence of long-lasting transients of

activity in simple neural networks, *Biol. Cybernetics.* 67 (1992). P. 269–277. DOI:10.1007/BF00204400.

2. *Riecke H., Roxin A., Madriga S., Solla S.A.* Multiple attractors, long chaotic transients, and failure in small-world networks of excitable neurons // *Chaos.* 17 (2) 2007. P. 026110. DOI:10.1063/1.2743611.

3. *Sysoev I.V., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D.* Reconstruction of ensembles of nonlinear neurooscillators with sigmoid coupling function // *Nonlinear Dynamics.* 95 (3) 2019. P. 2103–2116. DOI:10.1007/s11071-018-4679-y.

4. *Afraimovich V.S., Rabinovich M.I., Varona P.* Heteroclinic contours in neural ensembles and the winnerless competition principle // *International Journal of Bifurcation and Chaos.* 14 (04) 2004. P. 1195–1208. DOI:10.1142/S0218127404009806.

5. *Afraimovich V., Tristan I., Varona P., Rabinovich M.* Transient dynamics in complex systems: Heteroclinic sequences with multidimensional unstable manifolds, Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity. 2 (1) 2013. P. 21–41. DOI:10.5890/DNC.2012.11.001.

6. *Spencer S.* Neural networks in human epilepsy: evidence of and implications for treatment, *Epilepsia* 43(3) 2002. P. 219–227. DOI:10.1046/j.1528-1157.2002.26901.x.

7. *Bazhenov M., Timofeev I., Steriade M., Sejnowski T.J.* Model of thalamocortical slow-wave sleep oscillations and transitions to activated states // *Journal of neuroscience.* 2002; 22(19):8691–704. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.22-19-08691.2002.

8. *Hill S., Tononi G.* Modeling sleep and wakefulness in the thalamocortical system // *Journal of neurophysiology.* 2005. 93(3). P. 1671–1698. DOI: 10.1152/jn.00915.2004.

9. *Medvedeva T.M., Sysoeva M.V., Lüttjohann A., van Luijckelaar G., Sysoev I.V.* Dynamical mesoscale model of absence seizures in genetic models // *PLoS ONE,* 2020. 15(9). P. 239125. DOI: 10.1371/journal.pone.0239125.

10. *Kapustnikov A.A., Sysoeva M.V., Sysoev I.V.* Transient dynamics in a class of mathematical models of epileptic seizures // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,* 2022. 109. P. 106284. DOI:10.1016/j.cnsns.2022.106284.

11. *Вольнова А.Б., Ленков Д.Н.* Абсансная эпилепсия: механизмы гиперсинхронизации нейронных ансамблей // *Медицинский академический журнал.* 2012. Т. 12, № 1. С. 7–19.

Реализация радиофизической модели нейрона ФитцХью – Нагумо с аппроксимацией нелинейной функции диодами

Л.В. Такашвили¹, В.И. Пономаренко^{2,1}, И.В. Сысоев^{1,2}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Важным промежуточным этапом между математическими и биологическими моделями при моделировании активности мозга является использование экспериментальных радиофизических моделей нейронов. Это позволяет учитывать неидеальности и нестационарность элементов и связей между нейронами, включая аксоны, а также моделировать измерения, более близкие к естественному эксперименту. Самая простая известная колебательная модель нейрона – модель ФитцХью – Нагумо. Ее преимущество для схемотехнической реализации перед другими моделями заключается в том, что она имеет относительно несложную кубическую нелинейность. Известен ряд экспериментальных реализаций этой модели [1–3].

В данной работе за основу радиотехнической электронной модели нейрона была взята схема нейрона ФитцХью – Нагумо из статьи [1], поскольку в ней использованы простейшие элементы, минимальное число операционных усилителей, нет аналоговых умножителей. Контур состоит из двух сигнальных элементов питания, семи диодов, семи резисторов, двух индуктивностей, конденсатора и операционного усилителя. В исходной работе [1] использован очень сложный колебательный контур с двумя катушками, двумя ЭДС, дополнительным диодом. Также нелинейный элемент содержит 6 диодов и ряд дополнительных калибровочных резисторов. Столь большое число элементов плохо как с точки зрения сложности монтажа, так и из-за неидеальности и неидентичности диодов, конденсаторов и катушек: чем больше компонентов, тем сложнее контролировать параметры нейрона.

Цель данной работы – упростить схему таким образом, чтобы не потерять качественное соответствие (сохранить все динамические режимы), но значительно уменьшить число элементов в ней. При этом мы руководствовались следующими основными идеями: во-первых, нужно сократить колебательный контур до простейшего вида, избавиться от дополнительных элементов питания, уменьшить число диодов в схеме, насколько это возможно, в том числе за счет их перестановки. Все моделирование проводилось в симуляторе электрических цепей ngSPICE с открытым исходным кодом [4]. Результаты приведены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, мы избавились от одной ветки колебательного контура с катушкой, двух элементов питания, пересобрали цепь диодов, сделав ее несимметричной, и подвинули цепочку с операционным усилителем, в который включили дополнительный диод. Далее будет показано, что

включение диода D_{op} в цепь операционного усилителя и противопоставление одному диоду D_0 n диодов D_1 – D_n в нелинейном элементе значимо влияет на форму сигнала n , позволяя получить именно импульсные, нейрореподобные колебания.

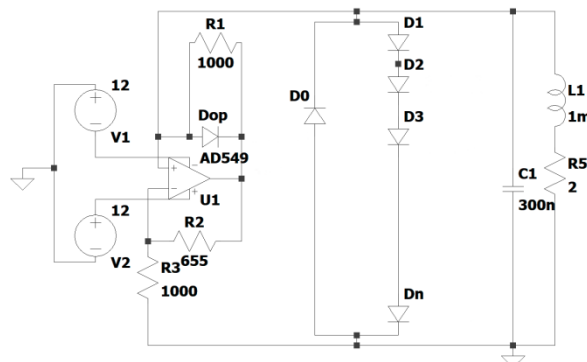


Рис. 1. Упрощенная нелинейная схема, где n – количество диодов в нелинейном элементе

Следующий этап – это исследование получаемого сигнала. Стоит пояснить, что за настройку сигнала ответствен резистор R_2 , который находится в цепочке операционного усилителя, он отвечает за настройку отрицательного сопротивления. Для начала мы изучили момент зарождения бифуркаций и далее рассмотрели зависимость сигнала от нашей модификации диодом цепи операционного усилителя.

На данном этапе наличие или отсутствие диода D_{op} в цепи обратной связи операционного усилителя AD549 не показывает качественной разницы. Однако после изучения предбифуркационного сигнала было выявлено, что колебания рождаются в результате бифуркации Андронова – Хопфа, т. е. полученная схема принципиально не отличается от схемы ФитцХью – Нагумо.

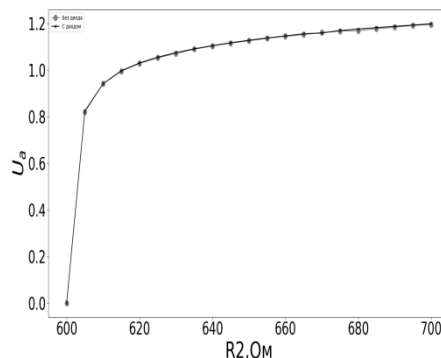


Рис. 2. Зависимость амплитуды напряжения от сопротивления управляющего резистора, с диодом в цепи операционного усилителя и без

Далее рассмотрим ВАХ нашей схемы (рис. 3).

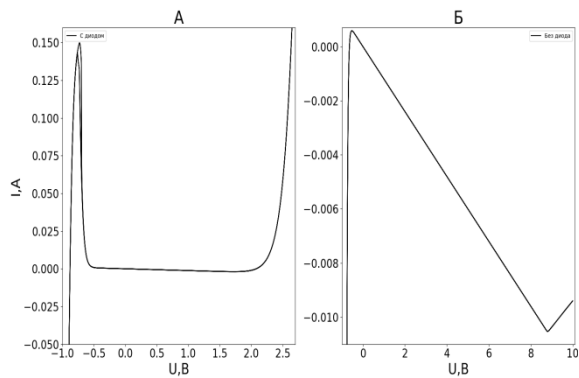


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика схемы, с диодом в цепи операционного усилителя (А) и без (Б)

Сопоставление графиков на рис. 3 (А и Б) более явно показывает качественную разницу наличия или отсутствия диода D_{op} в цепи операционного усилителя. Более нелинейное отрицательное сопротивление (А) позволяет получить сильно нелинейный режим импульсных колебаний, в то время как почти линейный участок с отрицательным наклоном (Б) приводит к тому, что колебания в цепи оказываются похожими на колебания в осцилляторе ван дер Поля.

Генерируемый сигнал будет зависеть от того, сколь большая часть ВАХ захватывается при колебаниях в цепи, что в нашей схеме определяется резистором R_2 .

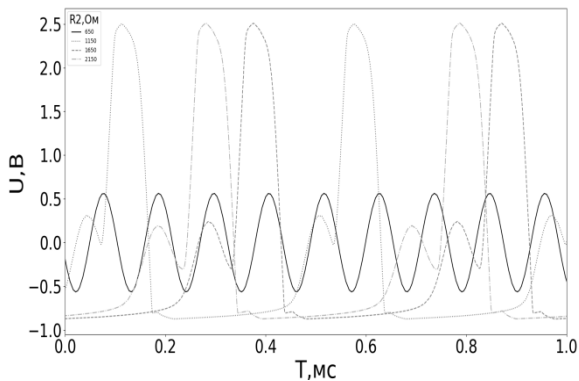


Рис. 4. График зависимости напряжения от времени при разных сопротивлениях управляющего резистора R_2 при наличии диода в цепи обратной связи

Как видно из рис. 4, при большом сопротивлении сигнал перестал быть синусоидальным, однако дальнейшее повышение сопротивления привело лишь к разнице в фазах между сигналами.

В ранее рассмотренных вариантах схемы при реализации нелинейного элемента рассматривались 3 диода D_1, D_2, D_3 ($n = 3$). Ясно, что на практике для простоты и надежности реализации нужно сократить число диодов до минимума, но при этом не выбросить наблюдаемые эффекты. Поэтому мы исследовали изменение сигнала в зависимости от количества n диодов в цепи.

Как видно при малом сопротивлении R_2 и различном числе диодов n , выходной сигнал различается только по фазе, а форма сигнала остается синусоидальной (рис. 5, В), что логично, потому что посещается только часть ВАХ вблизи $U = 0$, совпадающая для различных n . При большом сопротивлении R_2 помимо различий по фазе добавились значимые различия по форме и амплитуде колебаний: чем меньше диодов, тем сильнее сглаживается вершина пика, вплоть до похожего на плато сегмента. При этом зависимость частоты колебаний от n выражена слабее: в целом период лишь немного уменьшается с ростом n (рис. 5, Г). Вероятно, на рассмотренных частотах емкостные свойства диодов D_1-D_n оказываются несущественными.

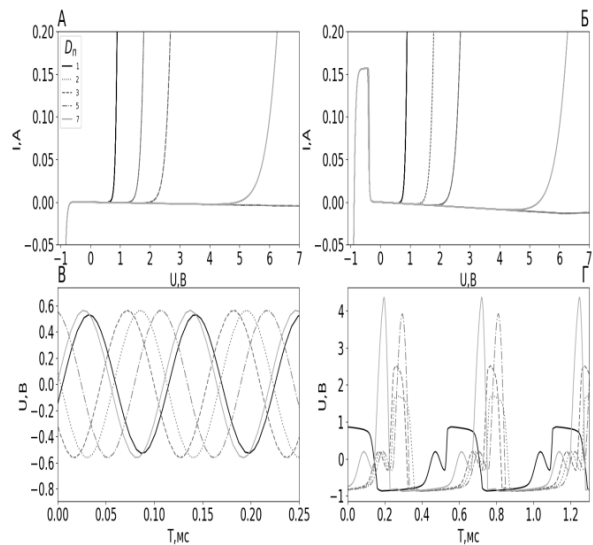


Рис. 5. Графики вольт-амперных характеристик и напряжения от времени при разном количестве диодов в цепи. Слева – при сопротивлении управляющего резистора 650 Ом, справа – 2150 Ом

Работа была выполнена при поддержке научного центра «Идея», грант № АСП-10-2022/II.

Литература

1. Binczak S., Jacquir S., Bilbault J.-M., Kazantsev V.B., Nekorkin V.I. Experimental study of electrical FitzHugh – Nagumo neurons with modified excitability // *Neural Networks*. 2006. Vol. 19. P. 684–693.
2. Li F., Liu Q., Guo H., Zhao Y., Tang J., Ma J. Simulating the electric activity of FitzHugh – Nagumo neuron by using Josephson junction model // *Nonlinear Dynamics*. 2012. V. 69. P. 2169–2179.
3. Kulminskiy D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Hramov A. E. Synchronization in ensembles of delay-coupled nonidentical neuronlike oscillators // *Nonlinear Dynamics*. 2019. Vol. 98(1). P. 735–748.
4. Madec M., Lallement C., Haiech J. Modeling and simulation of biological systems using SPICE language // *PLOS ONE*. 2017. Vol. 12(8).

Когнитивные процессы и нейросетевые архитектуры головного мозга

В.Л. Ушаков

Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, tiuq@yandex.ru

Основной задачей нейрокогнитивных исследований является исследование взаимосвязи психологических и физиологических процессов на нейросетевых архитектурах головного мозга. Для ее решения необходим мультидисциплинарный подход, объединяющий специалистов из разных областей знаний: нейробиологии, психологии, физиологии, математики, медицины, физики, лингвистики, философии, нейроинформатики, инженерии и др. Установление механизмов формирования и функционирования нейросетевых коррелятов когнитивных процессов позволяет сделать важный шаг к пониманию процессов сознания головного мозга и построению их модели. Практический результат таких исследований может быть использован в области инжиниринга нейроинтеллекта, в медицине, психиатрии и др.

Эволюционные и поведенческие исследования показали, что определенные когнитивные процессы наблюдаются у биологических объектов с разной степенью размера и сложности организации нервной системы: от моллюсков, насекомых до человека. Наблюдаемые когнитивные процессы в животном мире, как, например, построение «модели психического», модели будущего поведения, передача знаний путем культурной преемственности, использование орудий труда, построение архитектурных сооружений, врожденные чувства ухода за новорожденными, боли, самоузнавания, справедливости и взаимопомощи, способности к счету, наличие языковых кодов и возможности их перекодировки и пр. позволили проводить активные дискуссии о наличии разных уровней психической и сознательной деятельности в биологическом мире. Поиск взаимосвязи когнитивных и физиологических процессов был сосредоточен на разных масштабах изучения нейрональных ансамблей: от одиночных нейронов до крупномасштабных нейронных сетей головного мозга.

Нейрональный уровень исследований выявил специализации нейронов к тем или иным нейрокогнитивным процессам. В разных структурах головного мозга были показаны когнитивные нейроны, специализирующиеся в распознавании новизны, ошибочных действий, лиц, эмоций, концептуальные нейроны распознавания и припоминания объекта в разных модальностях, нейроны гнезда, нейроны предсказания действий, зеркальные нейроны, нейроны места, нейроны направления головы, границы и др. Специализированные нейроны функциональных систем активируются не только во время поведенческого акта, но и также после его окончания в реверсивном или прямом проигрывании во время воспоминания/ментального воображения или в ускоренном проигрывании во время сна. Около половины нейронов в сенсорных областях могут быть связаны с акти-

вацией функциональных систем в поведенческом акте, а не специализироваться только в распознавании физических особенностей внешнего стимула. Следует отметить, что в формировании поведенческого акта участвуют не один-два нейрона, а распределенная по пространству и времени нейрональная популяция. В области работ по функциональному нейрокартированию головного мозга человека недавно был составлен атлас из 1537 участков коры, в которых возникают различные виды ощущений в ответ на электрическую стимуляцию данного участка. Несмотря на полученные интересные результаты функциональной специализации нейронов, осталась проблема отсутствия информации об активности всех нейрональных популяций, соорганизующихся в функциональную систему при выполнении данного поведенческого акта. С помощью оптического имиджинга возможно визуализировать нейрональные ансамбли на срезах или в объеме мозга, но, за исключением немногочисленных работ, без получения временной динамики их активности. При этом существуют многочисленные данные о реорганизации нейрональных ансамблей, формирующих след памяти во времени после обучения, в состоянии сна или в процессах реконсолидации следов памяти после напоминания.

В анализе макромасштабных сетей анатомические исследования на основе метода магнитно-резонансной томографии (МРТ) позволили по изменению набора морфометрических показателей (средняя интенсивность МРТ-сигнала; объем подкорковых зон; площадь поверхности; объем серого вещества; толщина слоя серого вещества; стандартное отклонение по толщине; интегральная средняя кривизна; интегральная гауссова кривизна; индекс кривизны; индекс складчатости; индекс локальной гирификации; МР-спектроскопия; МР-миелинизация) проводить дифференциальные эволюционные и онтологические исследования развития структур и систем головного мозга. Для построения архитектур структурных связностей (коннектомов) головного мозга используется метод диффузионной трактографии (DTI), где на основе полученных данных строится взвешенный граф, в котором вершинами являются зоны головного мозга, а ребрами – количество проводящих путей, связывающих данные зоны. Для анализа структуры графа используются различные метрики, одна из наиболее интересных – выделение rich-club структур – вершин графа не только богатых связями, но и связанных между собой. Данная метрика показала хорошую представленность rich-club структур в сети по умолчанию (DMN) и разницу по количеству rich-club вершин в графах структурных связей нормы и больных с шизофренией (Ushakov et al., 2019). Наряду с исследовани-

ями структурной связности участков головного мозга важное значение имеет их функциональная (статистическая зависимость активностей) и эффективная (направленное влияние одних нейронных ансамблей на другие) связь. BOLD – сигнал (blood oxygenation level dependent) метода функциональной томографии (фМРТ) коррелирует в разной степени со спайковой активностью отдельных нейронов и высокочастотным (гамма) потенциалом локального поля (LFP). К сожалению, метод фМРТ обладает плохим пространственным разрешением (порядка миллиметров) и временным (порядка секунд), а из-за особенностей физиологии BOLD-сигнала в анализируемом вокселе трудно определить тип (тормозный или активирующий) передачи сигнала и происходит ли активация постсинаптических нейронов. Поэтому получаемые фМРТ-методом значимые изменения активности участков головного мозга стоит рассматривать как физиологически усредненные макромасштабные нейронные ансамбли, синхронизованные во времени, своего рода пространственно-временные окна, через которые информация мигрирует по структурам головного мозга. Создание multiband последовательности в фМРТ-технологиях позволило уменьшить в разы пространственно-временное разрешение и проводить исследования в событийно-связанной парадигме. В наших исследованиях это было успешно применено с дополнительным получением данных по фиксации взгляда от МРТ-совместимого айтрекера в нейрокартинговании дорсального и вентрального потока обработки визуальной информации и с дополнительным использованием данных МРТ-совместимого полиграфа в картировании следов памяти, связанных субъективно-значимой информацией. В наших работах были разработаны алгоритмы обработки многомерных и мультимодальных нейрофизиологических данных для расчета регрессоров микросостояний головного мозга, динамика которых может быть использована в построении функциональных коннектомов. Для задач регистрации изменений функциональных состояний нейросетей мозга были разработаны алгоритмы диагностики графодинамики сетей головного мозга на основе использования методов теории графов, дискретной дифференциальной геометрии и элементов теории Морса. Для анализа сложной иерархии сетей головного мозга человека был разработан подход построения гиперграфов и гиперсетей – иерархии «граф над графом», используя в качестве строительных блоков клики исходного графа (Knyazeva et al., 2016, 2018). Данный программный комплекс позволяет анализировать топологию функциональных коннектомов и их эволюцию во времени (Zavyalova et al., 2016), алгебраически описывая на языке групп гомологий цепей разной размерности сложные комбинаторные структуры, такие как симплициальные комплексы. Были получены алгоритмы построения функциональных коннектомов взаимодействия нейросетей головного мозга, поддер-

живающих данные микросостояния (Poyda et al., 2020). В настоящее время предложено множество разных методов по расчету взаимодействия регионов (Pereda et al., 2005), в том числе и в состоянии покоя, основанных на корреляции (Rodgers and Nicewander, 1988), причинность по Гренджеру (Granger, 1969), трансферной энтропии (Schreiber, 2000), когерентности (Lopes da Silva et al., 1989), взаимной информации (Grassberger et al., 1991) и т. д. Для построения коннективных связей предложен набор методов MULAN, включающий корреляцию, когерентность, взаимную информацию, трансферную энтропию (TE), направленную когерентность, причинность по Грейнджеру, байесовские сети (Ramsey et al., 2006) и другие. Методы оценки эффективной связности включают динамическое причинное моделирование (DCM) (Friston et al., 2003) и структурное моделирование уравнениями (SEM) (McIntosh and Gonzalez-Lima, 1994). В наших исследованиях были разработаны алгоритмы расчета и моделирования эффективных (причинно-следственных) связей между нейросетями головного мозга человека на основе метода динамического каузального моделирования (DCM). Используя метод DCM, были проведены исследования одновременного взаимодействия шести центров нейросети по умолчанию (DMN) в базовом для сознания человека состоянии покоя. Это потребовало сравнительного анализа около 3000 математических моделей (Ushakov et al., 2016). Была показана разная специализация левого и правого гиппокампа в механизмах поддержания базового уровня сознания, выявлены клинические следствия такой латерализации для протекания ряда синдромов поражения головного мозга человека (Velichkovsky et al., 2018). Разработанные алгоритмы были успешно протестированы при исследовании нейросетевых архитектур головного мозга автобиографической памяти (Zhigulina et al., 2020), нейросетей головного мозга, связанных с обработкой и извлечением из памяти личностно-значимой информации (Ushakov et al., 2019), построения нейросемантических карт русского языка на коре головного мозга (Velichkovsky et al., 2020; Ушаков и др., 2021; Nosovetz et al., 2023), активности зеркальных нейронов у человека при наблюдении и восприятии времени (Bushov et al., 2019), нейросетевого функционирования во время сна и переходах «сон-бодрствование» с применением скрытых марковских моделей, в когнитивных процессах инсайта и разных типов мышления (Ушаков и др., 2021), исследование особенностей нейросетевой структурно-функциональной архитектуры при параноидной (галлюцинации, бред) и кататонической симптоматике у больных с расщеплением сознания (диагноз шизофрения) и связи с иммунологическими и генетическими факторами (Ушаков и др., 2019) и т. д.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-78-00010, <https://rscf.ru/project/23-78-00010/>.

Распознавание людей с помощью сегментного спайкового нейрона по признакам, извлеченным сиамской сверточной нейронной сетью

И.С. Фомин¹, А.М. Корсаков^{1,2}, А.Е. Архипов^{1,2}

¹Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург; i.fomin@rtc.ru

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

На протяжении длительного времени известна задача обнаружения и сопровождения людей на видеоизображении с неподвижной или подвижной камеры с учетом различных усложняющих факторов. Траектории движения людей могут пересекаться, один и тот же человек может заходить за препятствия и выходить из-за них, покидать область кадра и возвращаться в него, переходить из поля зрения одной видеокамеры охранного периметра в область поля зрения другой камеры. Во всех рассмотренных случаях основополагающей задачей является создание способа подготовки и преобразования изображения объекта (человека) таким образом, чтобы получить вектор признаков, позволяющий с достаточной точностью сопоставить человека с одной из ранее наблюдавшихся траекторий.

Сопоставление объектов, или реидентификация, является достаточно специфичной задачей в видеонаблюдении, и требуется, когда нужно, не только обнаружить движение или нарушителя в заданной области периметра, но и осуществить его сопровождение. Это может использоваться для выявления подозрительно долго шатающихся в области людей (loitering detection), для составления примерного маршрута человека или автомобиля в области, где существует развитое городское видеонаблюдение.

Стандартным подходом является использование сетей, при котором изображение каждого объекта обрабатывается стандартной или модифицированной сетью для извлечения вектора представлений, а обучение строится на том, что поведение векторов представлений и их распределение в пространстве представлений по результатам обучения было бы удобно для решения задачи, которую перед собой ставит автор алгоритма.

Кроме стандартных способов определения близости векторов и отнесения объекта к одному из классов, основанных на евклидовом расстоянии между точками, принадлежащими изображению в пространстве представлений, существуют и более интересные, биоинспирированные подходы. В работе [1] рассмотрена авторская биоподобная сегментная спайковая модель нейрона, хорошо показавшая себя в задаче классификации (см., напр., [2]). Модель способна успешно классифицировать даже сложные, линейно не разделяемые данные при условии сравнительно небольшой размерности и компактности векторов представлений.

В данной работе решается задача поиска таких параметров функции ошибки и алгоритма обучения, чтобы успешно обучить существующую

сверточную нейронную сеть построению представлений, хорошо подходящих для классификации объектов сегментным спайковым нейроном в пространстве представлений.

Сиамские нейронные сети в сопровождении

В основном в задаче идентификации при сопровождении напрямую используется выход сиамской сверточной нейронной сети для оценки функции принадлежности вместо обычной дистанции между векторами.

Основная идея сиамских сетей [3] – обучить нейронную сеть, использующую информацию с двух или более изображений, чтобы различить их наилучшим образом. Обычно часть извлечения признаков для всех изображений общая, далее идут различные способы сравнения, сопоставления, разделения. В работе [4] предлагается сиамская сеть, обученная на контрастной функции ошибки. Она принимает на вход два изображения, их IoU, и выдает оценку схожести. В [5] сеть принимает на вход не полные изображения, а их фрагменты и выдает оценку схожести уже между ними. В [6] рассматривается триплетная функция ошибки (triplet loss), аналогичная той, что будет использована в данной работе. В статье [7] авторы делают следующий шаг, и, добавляя еще один пример, формируют четверную функцию ошибки, где на входе 3 примера одного объекта за последние 3 кадра и 1 пример другого объекта. В режиме работы сеть использует обученную сеть-дескриптор для построения представлений и рассчитывает сопоставление уже между ними. В [8] выполняется сравнение на 128-мерном векторе представлений, извлекаемом тройной сверточной сетью, описанной в [9]. В [10] приводится сверточная сеть для предсказания нового положения, которая способна извлекать представления из фрагментов изображения для уточнения сопоставления при получении нового кадра. В [11] показан алгоритм сопоставления с использованием GoogLeNet, обученный с использованием triplet loss. Сеть R-FCN [12] используется для генерации предположений о положении объекта на основе траектории и признаков с предыдущих кадров, потом предположения объединяются с реальными обнаружениями и используется обученная GoogLeNet для уточнения.

Вывод из рассмотренных работ можно сделать однозначный: использование сверточных сетей для извлечения векторов признаков желаемого размера является общепринятым подходом, который актуален для применения в данной работе.

Среди рассмотренных подходов к обучению сети для получения представлений был избран triplet loss, как наилучшим образом отвечающий задаче формирования кластеров в пространстве признаков для каждого из классов сопровождаемых объектов. Параметры функции ошибки позволяют контролировать степень разобщенности и делимости кластеров, как будет показано далее. Также данный подход демонстрирует способность к выявлению более сложных, надклассовых структур, которые напрямую в функции ошибки и обучающем наборе данных не отражаются. Эксперименты, показывающие превосходство triplet loss над иными функциями ошибки, в данной работе сознательно опущены.

Сегментная спайковая модель нейрона CSNM и структурное обучение

В настоящей работе использовалась сегментная спайковая модель нейрона (CSNM) [1]. Мы здесь не ставили своей задачей подробное математическое описание использовавшейся модели нейрона, это можно найти в вышеуказанной работе.

Предполагаем, что на вход поступают спайки, которые преобразуются в синапсах в выходную величину, отображающую влияние синаптического тока на сегмент мембраны нейрона (рис. 1).

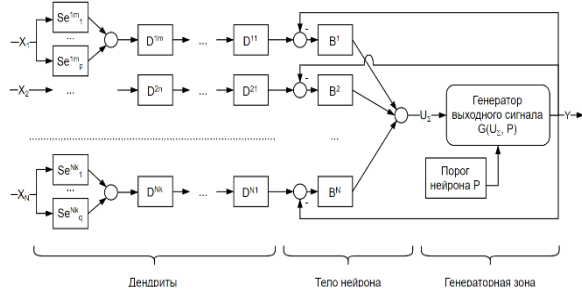


Рис. 1. Структура сегментной спайковой модели нейрона: Se^{ij}_l – входной синапс l , связанный с сегментом дендрита D^{ij} ; D^{ij} – j -й сегмент i -го дендрита; B^k – k -й сегмент тела нейрона

Полагаем, что нейроны обмениваются информацией через события (возникновение спайков), которые можно представить по формуле

$$x_i = \begin{cases} 1, t \in [t_i; t_i + \Delta t] \\ 0, t \notin [t_i; t_i + \Delta t], \end{cases} \quad (1)$$

где x_i – выход нейрона в i -й интервал времени, а t – время.

Представленная структурная организация модели нейрона позволяет проводить расчет систем дифференциальных уравнений для каждого нейрона независимо, поскольку нейроны обмениваются исключительно информацией о моменте времени возникновения спайка, а входной вектор системы уравнений модели нейрона формируется внутри модели как функция от моментов времени прихода спайков. Размер нейрона (число сегментов сомы), множество длин дендритов и число возбуждающих и тормозных синапсов для каждого сегмента мембраны определяют структуру нейрона, которая формирует требуемую реакцию на входные воздействия.

Данный нейрон характеризуется особенной методикой структурного обучения. Согласно ей, для заданного количества сегментов сомы сначала выполняется процедура синхронизации, когда последовательно наращиваются длины дендритов, чтобы обеспечить одновременность прихода сигнала на сому, затем процедура нормализации, когда наращивается число синапсов, чтобы компенсировать падение уровня сигнала при прохождении по элементам дендрита, комбинация этих операций обеспечивает настройку на паттерн импульсов.

Использованный набор данных

В качестве источника исходных данных для формирования обучающего и тестового наборов была использована видеозапись со стационарной видеокамеры низкого качества, со слабой цветопередачей. Общая длительность записи составляет около 8 минут. В рамках сюжета 4 человека входят в кадр и выходят за границы кадра, проходя через различные области кадра и совершая различные действия. Для упрощения действия, связанные с изменением положения тела (наклоны, приседания, лежание) или скорости (бег), были исключены из рассмотрения, оставлено только движение шагом в различных областях и направлениях. Всего было извлечено 34 траектории, принадлежащие 4 разным людям. Под отдельной траекторией здесь понимается набор изображений человека от момента появления в кадре до момента выхода из него. Если тот же человек заходит в кадр повторно, формируется новая последовательность кадров и новая траектория.

Собранные данные были распределены на обучающий и тестовый наборы данных, где первые 25 траекторий используются для обучения сети, остальные 9 – для тестирования. Траектории расставлены по номерам в соответствии с номером первого кадра, в котором траектория начинается. Так, кроме прочего, моделируется ситуация, когда алгоритм распознавания сначала обучается на некотором количестве кадров, а потом используется для распознавания тех же объектов.

Всего в обучающем наборе 1875 примеров на 25 классов (что соответствует 1875 триплетам при обучении), в тестовом наборе 616 примеров для тестирования (что соответствует новым 616 точкам в пространстве признаков).

Сверточная сеть для формирования представлений

Для формирования представлений была использована известная сверточная нейронная сеть ResNet-18 с избыточными соединениями [13]. Сеть содержит 18 блоков с разветвлениями на несколько веток с различными размерами признаков и обходными соединениями. Версия 18 относительно мала и применима для использования в том числе на встраиваемых устройствах с поддержкой аппаратного ускорения нейросетевых вычислений. Структура сети с обходными соединениями позволяет данным как бы «обтекать» некоторые

слои и извлекать признаки на разных масштабах. В других архитектурах для того, чтобы учесть масштаб, используются подходы с пирамидой признаков и специальными сетями вроде FPN [14] для извлечения признаков на различных масштабах изображения перед передачей в решающую часть.

В данной работе для использования в качестве формирователя точек в пространстве представлений последний слой из 1000 нейронов в сети ResNet-18, предобученной на наборе данных ImageNet, был заменен слоем из двух линейных нейронов (сумма входов с весовыми коэффициентами и линейным смещением), выходы которых соответствуют координатам в пространстве представлений.

Использованная функция ошибки

В качестве функции ошибки используется известный подход *triplet loss*. Суть данного подхода в следующем. В качестве входных данных выступают три изображения, два из которых принадлежат одному классу (в настоящей работе – одной траектории), а третье – любому другому классу. Первое изображение считается якорным (целевой класс), второе – положительным (также целевой класс), третье – отрицательным (любой другой класс). Все три изображения обрабатываются сетью формирования представлений, после чего извлеченные векторы в пространстве представлений поступают на вход функции ошибки. Цель функции – минимизировать расстояние в пространстве представлений между точками, принадлежащими якорному и положительному изображениям, максимизировать расстояние между точками, принадлежащим якорному и отрицательному изображениям. В математическом виде это выражается формулой

$$L(m_p, m_n, t, a, p, n) = \max\{m_p d(a, p) - m_n d(a, n) + t, 0\}, \quad (2)$$

где $d(\dots)$ – L_2 -норма между векторами в пространстве представлений; a, p, n – векторы якорного, положительного и отрицательного изображений в пространстве представлений; m_p, m_n – множители положительного и отрицательного воздействия; t – ограничивающее разброс слабое.

Модификация алгоритма обучения

При обучении сети в рассмотренных работах с *triplet loss* позволено выбирать отрицательные примеры из любой точки входных данных. Проведенные эксперименты показали, что при таком подходе вне зависимости от параметров обучения распределение приходит к двум мегакластерам, пример показан на рис. 2. В этом случае более половины примеров в батче имеют $d(a, p) \ll \ll d(a, n)$, и большая часть примеров имеет *loss* меньший или равный нулю. В определенный момент спад *loss*-функции определяется сжатием классов вокруг мегакластера, и на этом все заканчивается.

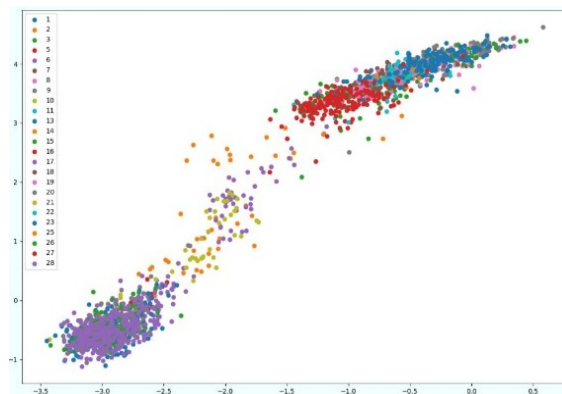


Рис. 2. Распределение точек при стандартном обучении

Для компенсации этого предложен механизм взвешенного выбора примеров на основе расстояния между центрами масс каждого класса. По завершении эпохи обучения для каждого класса считается центроида в пространстве состояний, и для выбора отрицательных примеров для каждого класса используется только некоторый процент ближайших классов. Данный подход позволяет существенно повысить скорость сходимости *loss*-функции и получить уверенное разделение точек на кластеры уже к 50–100-й эпохе обучения при полном отсутствии сходимости или схождении к 400–500-й эпохе без данной модификации.

Эксперименты со спайковой нейросетью

Для обучения спайковой сегментного нейрона были выбраны веса сети, которые переводят обучающие примеры в пространство состояний, показанное на рис. 3. Для перевода признаков в задержки для спайкового нейрона значения были нормированы в область $[0; 1]$ по обеим координатам, после чего поделены на 5 для попадания в период работы спайкового нейрона. Также был добавлен служебный калибровочный сигнал 0,2.

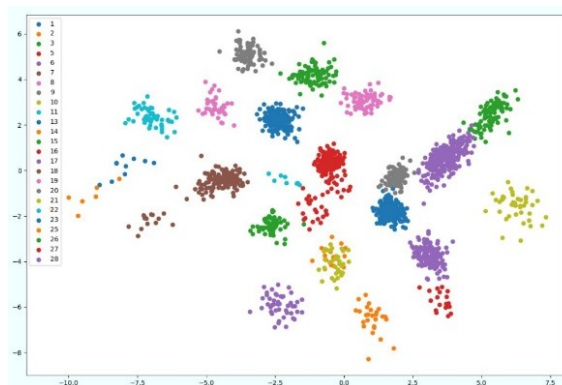


Рис. 3. Распределение точек при доработанном обучении

Для обучения избрана следующая схема спайковой нейронной сети. Для каждого из классов (траекторий) обучающего набора выделен один нейрон, призванный реагировать на изображения соответствующего класса. Всего 25 нейронов с 3 вхождениями (дендритами) в каждом, где 2 дендрита принимают на вход спайки с задержкой, пропорциональной координате в пространстве состояний,

3-й (калибровочный) дендрит принимает на вход спайк с задержкой 0,2.

По результатам обучения точность работы классификатора на обучающих данных в пространстве состояний составила 99,1%, на тестовых данных 75,9%.

Кроме результатов по определению точности отнесения точки к определенной траектории, был проведен эксперимент по определению точности отнесения точки к метаклассу. Каждая из 34 траекторий набора относится к одному из 4 человек, внешний вид которых не менялся в рамках записи. Примем за правильную реакцию на точку тот факт, что на нее отреагировал хотя бы один нейрон, обученный на пример, относящийся к тому же метаклассу. Общее соотношение для тестового и обучающего набора, а также каждого метакласса в отдельности показано в таблице. Здесь точность (Т) – отношение правильно определенных к общему числу примеров (класса) в наборе. Полнота (П) – отношение числа правильно определенных к сумме примеров (класса) в наборе.

Набор	Обучающий		Тестовый	
	Т	П	Т	П
Метрика				
Человек 1	0,987	0,951	0,919	0,813
Человек 2	0,999	0,985	0,653	0,989
Человек 3	0,998	0,988	0,776	0,882
Человек 4	0,891	0,947	1,000	0,197
Все	0,991	0,978	0,759	0,725

Явно наблюдается проблема с точностью 4-го метакласса на тестовом наборе. Это связано с тем, что четвертому метаклассу в тестовом наборе соответствует небольшое число примеров, правильно отнесенных в область около соответствующих нейронов (отсюда высокая точность), и некоторое число примеров, разнесенных ближе к остальным метаклассам (низкая полнота). Общий результат имеет высокое качество с учетом обучения нейронов по одному примеру.

Заключение

В данной работе рассмотрено обобщение задачи классификации с помощью сегментного спайкового нейрона на задачу распознавания изображений людей. Показано, что с некоторыми модификациями механизм обучения с triplet loss способен успешно перевести изображения в пространство R^2 , на котором возможна классификация примеров сегментным спайковым нейроном.

В качестве дальнейших направлений работы рассматриваются исследование распознавания изображений, принадлежащих той же траектории, исследование различных архитектур сетей, различных схем перевода изображения в вектор признаков и способов кодирования признаков в спайки.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России

(FNRG 2022 0015 1021060307687-9-1.2.1 №075-01623-22-00 «Исследование методов создания самообучающихся систем видеонаблюдения и видеоаналитики на базе комплексирования технологий пространственно-временной фильтрации видеопотока и нейронных сетей»).

Литература

1. Бахшиев А.В., Демчева А.А. Сегментная спайковая модель нейрона // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2021 : труды VII Всероссийской конференции. 2021. С. 26–29.
2. Корсаков А. М., Астанова Л. А., Бахшиев А. В. Применение сегментной спайковой модели нейрона со структурной адаптацией для решения задач классификации // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21, вып. 3. С. 493–520.
3. Bertinetto L. et al. Fully-convolutional siamese networks for object tracking // Computer Vision–ECCV 2016 Workshops : Amsterdam, The Netherlands, October 8-10 and 15–16, 2016. Proceedings, Part II 14. Springer International Publishing, 2016. P. 850–865.
4. Kim M., Alletto S., Rigazio L. Similarity Mapping with Enhanced Siamese Network for Multi-Object Tracking : препринт arXiv:1609.09156 [cs]. 2017.
5. Wang B., Wang L. et al. Joint Learning of Convolutional Neural Networks and Temporally Constrained Metrics for Tracklet Association // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. 2016. P. 1–8.
6. Zhang S., Gong Y. et al. Tracking Persons-of-Interest via Adaptive Discriminative Features // Computer Vision – ECCV 2016 : Lecture Notes in Computer Science / eds. B. Leibe et al. Cham: Springer International Publishing, 2016. P. 415–433.
7. Son J., Baek M., Cho M., Han B. Multi-Object Tracking With Quadruplet Convolutional Neural Networks // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017. P. 5620–5629.
8. Zhu J., Yang H., et al. Online Multi-Object Tracking with Dual Matching Attention Networks // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2018. P. 366–382.
9. Hermans A., Beyer L., Leibe B. Defense of the Triplet Loss for Person Re-Identification : препринт arXiv:1703.07737 [cs]. 2017.
10. Zhou H., Ouyang W. et al. Deep Continuous Conditional Random Fields With Asymmetric Inter-Object Constraints for Online Multi-Object Tracking // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2019. V. 29, # 4. P. 1011–1022.
11. Chen L., Ai H., Zhuang Z., Shang C. Real-Time Multiple People Tracking with Deeply Learned Candidate Selection and Person Re-Identification // IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). 2018. P. 1–6.
12. Dai J. et al. R-fcn: Object detection via region-based fully convolutional networks // Advances in neural information processing systems. 2016. V. 29.
13. He K. et al. Deep residual learning for image recognition // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. P. 770–778.
14. Lin T. Y. et al. Feature pyramid networks for object detection // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017. P. 2117–2125.

Анализ эффективности использования линейных и нейроподобных процедур в обработке гидроакустических сигналов на фоне реальных морских шумов

А.Г. Хоботов, В.И. Калинина, А.И. Хилько, О.В. Шемагина

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, algenn3@gmail.com

В настоящее время искусственные нейронные сети, построенные по аналогии с системами обработки информации в естественных нейронных сетях в живых организмах, активно исследуются и широко используются для решения различных практических задач. Разработка таких алгоритмов обработки сигналов, которые основаны на работе нейронов, показывает свою эффективность в различных приложениях. В частности, в обработке гидролокационных сигналов.

Обработка гидроакустических сигналов при подводной локации является сложной, многопараметрической задачей, имеющей большую степень неопределенности вследствие неточности моделей или высокого уровня помех. В технике локационные операции принято называть согласованной фильтрацией. Суть ее заключается в определении величины рассогласования входного сигнала с тестовым. Величина рассогласования определяется на основе определения значения функции невязки. Реализация и последующий анализ различных вариантов реализации таких функций для исследования реальной гидроакустической обстановки приводится в настоящей работе.

Основные подходы к анализу сигналов

Известно, что согласованный фильтр, реализованный на основе корреляционной функции невязки в случае детерминированного сигнала и стационарного белого гауссовского шума, является оптимальным: такая обработка обеспечивает максимальное отношение сигнал-шум на выходе [1]. Однако в реальности условие стационарности шума на диапазонах наблюдения практически неосуществимо. Оценить стационарность реального шума можно, например, с помощью показателя Херста. Он был разработан Гарольдом Эдвином Херстом [2, 3] и в настоящее время находит широкое применение в различных приложениях (см., например, [7] – метод нормированного размаха (RS-анализ). Он заключается в вычислении эмпирического показателя, известного как показатель Херста и определяемого соотношением (1).

$$Hu = \frac{\log(R/S)}{\log(\tau/2)}, \quad (1)$$

где τ – интервал времени, S – стандартное отклонение ряда на этом интервале, R – «размах» временного ряда на временном интервале.

Значения показателя Херста позволяют отличить: устойчивый тренд (персистентность) при

$Hu > 0,5$; отсутствие тренда (белый шум) при $Hu = 0,5$; неустойчивый тренд (антиперсистентность) при $Hu < 0,5$. Для большинства природных процессов этот показатель равномерно распределен вокруг значения 0,7 со стандартным отклонением, равным примерно 0,09.

На рис. 1, 2 представлен пример графиков реальных акустических шумов, полученных в натуральных условиях Черного моря на конечном интервале наблюдения. Показатели Херста для них равны 0,702 и 0,697 соответственно для графиков 1 и 2. А их спектры распределены неравномерно по диапазону частот, что говорит о том, что шумы существенно отличаются от белого, пример спектра которого приведен на рис. 3 (линия 1).

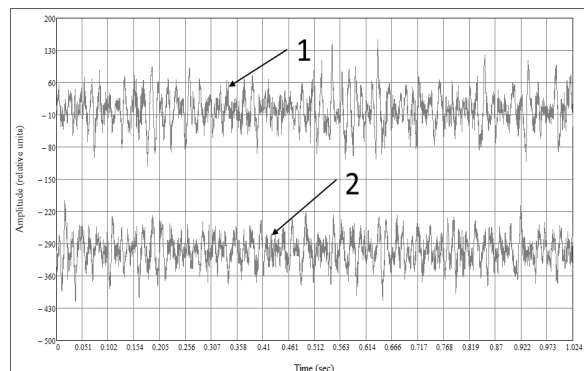


Рис. 1. Графики реальных гидроакустических шумов, развертка по времени

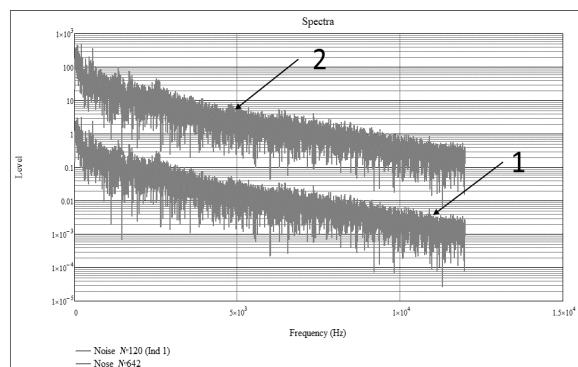


Рис. 2. Спектры реальных гидроакустических шумов

В этой связи в условиях нестационарности входного шума особую важность приобретает сопоставительная оценка эффективности функций невязки различной природы, в частности линейной общепринятой ковариационной функции и функций, основанных на нелинейном нейропо-

добном операционном базисе. Оценка эффективности осуществляется построением рабочих характеристик функций невязок – зависимости достоверности (вероятности правильного обнаружения 1-FRR) при заданном значении ложной тревоги – FAR от отношения сигнал/шум SNR на входе, при этом, естественно, учитывается только величина шума, распределенного в полосе тестового сигнала.

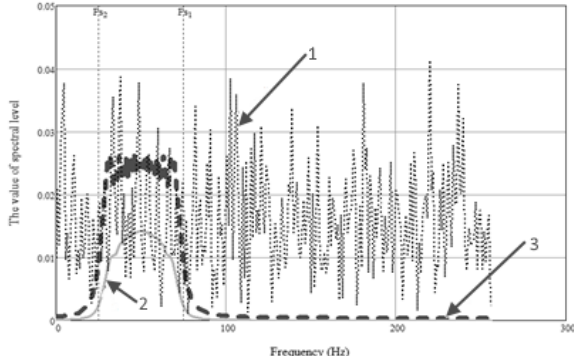


Рис. 3. Спектры: модельного белого шума (1), сигнальной ЛЧМ компоненты входа (2) и тестового ЛЧМ-сигнала (3)

Использование линейки гидрофонов, дает возможность анализировать характер пространственно-временной когерентности гидроакустических сигналов. В этом случае перспективным является подход основанный на сингулярном разложении матрицы сформированной из отсчетов входных сигналов гидрофонов. Ниже приводятся некоторые результаты применения такого подхода.

Нейроподобные функции невязки

Известно, что основными операционными элементами у объектов животного мира, как отмечено выше, являются нейроны, осуществляющие нелинейную пороговую операцию сигналов, поступающих на входы дендритов с синаптических контактов и формирующих выходные сигналы на выходах аксонов. Упрощенной математической моделью нейрона является модель нейрона Маккалока – Питтса [4]. Модификация этой модели, а именно коммутативная модель нейроподобной функции невязки (2) приведенная в работах [5–9]) использовалась для реализации функции нелинейной невязки.

$$\Theta(y(t), x(t)) = \frac{\int_{t_0}^{t_n} \max[|x(t)| \times L(t), |y(t)| \times M(t)] dt}{\int_{t_0}^{t_n} |x(t)| dt + \int_{t_0}^{t_n} |y(t)| dt}, \quad (2)$$

$$L(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } -|y(t)| \leq [x(t) - y(t)] \cdot \frac{x(t)}{|x(t)|} \\ 1, & \text{if } -|y(t)| > [x(t) - y(t)] \cdot \frac{x(t)}{|x(t)|} \end{cases}$$

$$M(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } -|x(t)| \leq [y(t) - x(t)] \cdot \frac{y(t)}{|y(t)|} \\ 1, & \text{if } -|x(t)| > [y(t) - x(t)] \cdot \frac{y(t)}{|y(t)|} \end{cases}$$

где $x(t)$ – тестовый сигнал, $y(t)$ – входной сигнал (смесь лоцируемого сигнала и шума на входе), N_c – эмпирический нормировочный коэффициент.

В данной модели, в отличие от модели нейрона Маккалока – Питтса, порог нейроподобного элемента меняется в зависимости от амплитуд сигналов. По сути, основное отличие описанной выше функции нейроподобной невязки от функции корреляции заключается в замене линейной операции умножения сигнальных отсчетов процедурой модуляции сигналов, при которой отсчеты выходных сигналов на участках совпадения амплитудных характеристик «обнуляются» (2), либо, наоборот, «обнуляются» несовпадающие участки сигналов (3):

$$\Theta(y(t), x(t)) = \frac{\int_{t_0}^{t_n} \max[|x(t)| \times L(t), |y(t)| \times M(t)] dt}{\int_{t_0}^{t_n} |y(t)| dt},$$

$$L(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } -|y(t)| \leq [x(t) - y(t)] \cdot \frac{x(t)}{|x(t)|} \\ 0, & \text{if } -|y(t)| > [x(t) - y(t)] \cdot \frac{x(t)}{|x(t)|} \end{cases}, \quad (3)$$

$$M(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } -|x(t)| \leq [y(t) - x(t)] \cdot \frac{y(t)}{|y(t)|} \\ 0, & \text{if } -|x(t)| > [y(t) - x(t)] \cdot \frac{y(t)}{|y(t)|} \end{cases}$$

Таким образом формируется функция нейроподобной невязки. Рисунок 4 иллюстрирует этот процесс.

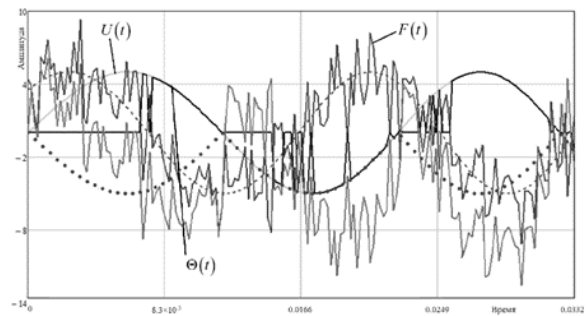


Рис. 4. Иллюстрация работы нейроподобной невязки: $U(t)$ – тестовый сигнал, $F(t)$ – входной сигнал, $\Theta(t)$ – сигнал на выходе нейроподобной функции невязки

Сопоставительный анализ функции нейроподобной невязки в сравнении с ковариационной производился на основе численного стохастического моделирования с использованием математических пакетов MATHCAD и MATLAB.

В качестве критерия оценки согласованной фильтрации, как принято в системах локации, используется критерий Неймана – Пирсона (рис. 5), при котором для заданного значения вероятности ошибки ложного срабатывания (FAR) определяется допустимое значение вероятности ошибки пропуска цели (FRR).



Рис. 5. Графики плотностей вероятностей шума и смеси шума и сигнала (графическая интерпретация критерия Неймана – Пирсона)

В качестве лоцируемого и тестового сигналов в модели используются ЛЧМ-сигналы. Входной и тестовый сигналы подвергаются процедуре согласованной фильтрации, формируя отсчеты функций невязки. В работах [5–9] приводятся результаты сопоставительного анализа нейроподобных и ковариационных функций невязки применительно к модельным шумовым сигналам, имеющим нормальное распределение, характеризующееся тем, что нормально распределенный шум имеет максимальную энтропию, т. е. при заданной мощности максимально искажает сигнальную составляющую. В настоящей работе приводятся результаты анализа применительно к реальным гидроакустическим шумам в сопоставлении с модельными шумами.

Оценка результатов анализа нейроподобных и ковариационных невязок

Исследование функций невязок проводилось на реальных гидроакустических шумах при следующих условиях:

- частота дискретизации 1600 Гц;
- глубина моря 15 метров;
- длительность отдельной реализации 1,5 с;
- при вычислении отношения сигнал-шум учитывался шум в полосе тестового сигнала;
- пороговое значение FAR – вероятности пропуска цели – равно 0,01.

Для анализа исследовались реализации реального шума Черного моря с нарастающим трендом, в сопоставлении с модельными реализациями совпадающими с реальными по частоте дискретизации, длительности, дисперсии и имеющими гауссовский закон распределения. На рис. 6–9 представлены рабочие характеристики, характеризующие сравнение нейроподобных и ковариационных функций невязок (по оси абсцисс – отношение сигнал-шум (ОСШ) – SNR в децибелах, по оси ординат достоверность-вероятность правильного обнаружения 1-FRR). На рис. 6–9 пунктирная линия характеризует корреляционную невязку, сплошная – нейроподобную.

Анализ данных экспериментов в Черном море выявил наличие персистентности, в частности инкрементный характер гидроакустических шумов, что, возможно, обусловлено гидрологической обстановкой в конкретной морской акватории на

момент эксперимента. Сопоставительный анализ рабочих характеристик для реального шума, имеющего инкрементный тренд (рис. 9), и модельного инкрементного шума с разницей дисперсий шума, определяющего порог σ_1^m по отношению к дисперсии шума в смеси с сигнальной компонентой σ_2^m $\sigma_2^m = 2\sigma_1^m$ (рис. 7) показывает хорошее совпадение экспериментальных и модельных данных, что иллюстрирует преимущество нелинейных нейроподобных функций невязок в условиях нестационарного шума.

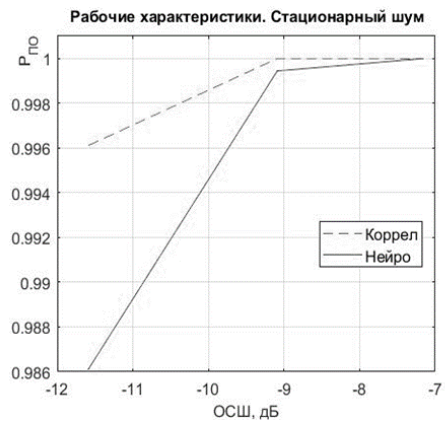


Рис. 6. Рабочая характеристика для модели стационарного нормального шума (нейроподобная функция невязки (2))

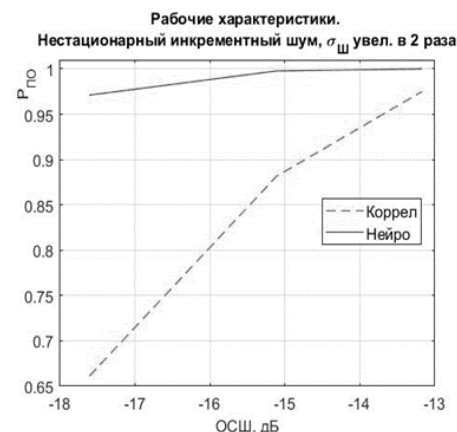


Рис. 7. Рабочая характеристика для модели инкрементного шума, распределенного по нормальному закону (нейроподобная функция невязки (2))

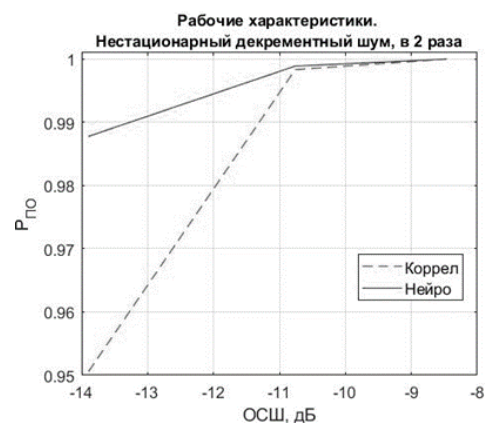


Рис. 8. Рабочая характеристика для модели декрементного шума, распределенного по нормальному закону (нейроподобная функция невязки (3))

Рабочие характеристики. Нестационарный инкрементный шум из данных эксперимента в Черном море

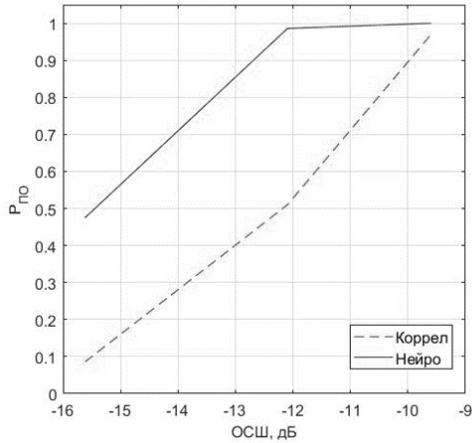


Рис. 9. Рабочая характеристика для нестационарного инкрементного шума из экспериментальных данных, полученных в Черном море (нейроподобная функция невязки (2))

Понятие сингулярного разложения матрицы

Известно, что сингулярным разложением матрицы M порядка $m \times n$ является разложение следующего вида:

$$M = U \Sigma V^*, \quad (4)$$

где Σ – матрица размера $m \times n$ с неотрицательными элементами, у которой элементы, лежащие на главной диагонали – это сингулярные числа (а все элементы, не лежащие на главной диагонали, являются нулевыми), а матрицы U (порядка m) и V (порядка n) – это две унитарные матрицы, состоящие из левых и правых сингулярных векторов соответственно (а V^* – это сопряженно-транспонированная матрица к V), [7]. Неотрицательное вещественное число σ называется сингулярным числом матрицы M , когда существуют два вектора единичной длины $u \in K^m$ и $v \in K^n$ такие, что:

$$Mv = \sigma u \quad \text{и} \quad M^* u = \sigma v. \quad (5)$$

Векторы u и v называются сингулярными векторами, соответствующими сингулярному числу σ [10]. Сингулярное разложение обладает свойством, которое связывает задачу отыскания сингулярного разложения и задачу отыскания собственных векторов. (Собственный вектор x матрицы A – такой вектор, при котором выполняется условие $Ax = \epsilon x$, число ϵ называется собственным числом.) Квадраты сингулярных чисел λ матрицы A являются ее собственными значениями $\epsilon = \lambda^2$. Величина $\chi(A)$ – число обусловленности матрицы есть отношение ее первого сингулярного числа к последнему.

$$\chi(A) = \frac{\lambda_1}{\lambda_n}. \quad (6)$$

Число обусловленности – оценка близости матрицы к матрице неполного ранга (для квадратных матриц – к вырожденности). Число обусловленности матрицы показывает, насколько матрица близка к матрице неполного ранга (для квадрат-

ных матриц – к вырожденности. Используя понятия линейной алгебры, можно привести условия вырожденности [11]:

- *Строки или столбцы матрицы линейно зависимы*, если она содержит пропорционально взаимосвязанные строки или столбцы; другими словами, одна или несколько ее строк (столбцов) точно выражаются как линейная комбинация всех или некоторых других ее строк или столбцов.
- *Квадратная матрица A вырождена* тогда и только тогда, когда у нее есть хотя бы одно нулевое собственное значение $\epsilon = 0$.

Функция невязки, основанная на сингулярном разложении сигнальной матрицы

В большинстве практических случаев процедура сигнальной гидролокации основана на сигналах линейки из гидрофонов. Конкретная топология такой системы из 180 гидрофонов показана на рис. 6.

Исходя из изложенного выше можно сделать вывод, что число обусловленности определяет «степень» линейной зависимости между строками или столбцами матрицы. В том случае, если матрица нормальна и допускает ее сингулярное разложение, что позволяет на этой основе реализовать процедуру, формирующую функцию невязки, с последующей оценкой числа обусловленности матрицы используемого в качестве дискриминирующего параметра:

- Индексы строк матрицы соответствует номерам гидрофонов (рис. 10) упорядоченному по пространственной координате.
- Индексы столбцов соответствуют номерам сигнальных отсчетов, упорядоченных по временной координате.

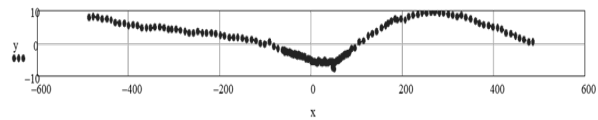


Рис. 10. Схема расположения гидрофонов

В этом случае в качестве функции невязки используется оценка числа обусловленности матрицы A

$$\chi'(A) = \frac{\lambda_1}{\lambda}, \quad (7)$$

где $\bar{\lambda}$ – среднее значение вектора сингулярных чисел. При относительно малых размерах матрицы минимальное (последнее) значение сингулярного числа сильно варьируется от реализации к реализации (имеет большую дисперсию). В этом случае среднее значение, не меняя смысла, является более устойчивой оценкой.

В качестве иллюстрации работы такой невязки рассмотрим анализ сигналов, представленных на рис. 11. Процедура сопоставительного анализа состоит в вычислении и последующем сравнении чисел обусловленности матриц, состоящих только из сигнальных отсчетов конкретных гидрофонов

(матрица A) и смеси сигнальных отсчетов и отсчетов лоцируемого ЛЧМ-сигнала (матрица \tilde{A}).

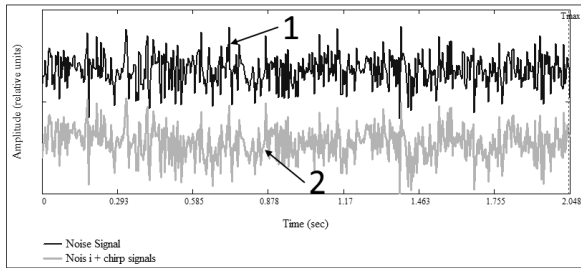


Рис. 11. Графики сигналов: 1 – сигнал гидрофона, 2 – сигнал гидрофона в смеси с ЛЧМ-сигналом (рис. 13, 15)

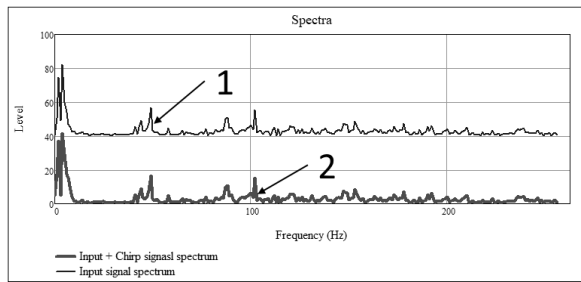


Рис. 12. Спектры сигналов (см. рис. 11): 1 – гидрофона, 2 – гидрофона в смеси с модельным ЛЧМ-сигналом (см. далее рис. 13, 15). (На рисунке спектр сигнала гидрофона сдвинут по оси ординат вверх на 40 значений)

На рис. 13 границы участка сигнальных отсчетов, формирующие матрицы сигнальных отсчетов, выбраны произвольно как по положению (позиции начального индекса сигнальных отсчетов), так и по размеру (количеству отсчетов). Конкретно размер матриц A и \tilde{A} равен 95 x 95 отсчетов, границы участка сигнальных отсчетов равны 0,572 с и 0,948 с соответственно. Числа обусловленности (6), определяемые вектором сингулярных чисел (рис. 14), соответственно для смеси отсчетов входных сигналов гидрофонов и тестовых сигналов и только отсчетов входных сигналов гидрофонов равны $\chi(\tilde{A}) = 5,154$ и $\chi(A) = 4,209$. Определяемое в качестве дискриминирующего параметра их отношение равно $\frac{\chi(\tilde{A})}{\chi(A)} = 1,225$. Соответственно значения оценок чисел обусловленности (7) равны: $\chi'(\tilde{A}) = 1,301$, $\chi'(A) = 1,285$ и $\frac{\chi'(\tilde{A})}{\chi'(A)} = 1,012$.

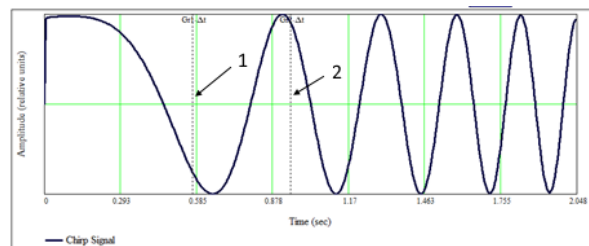


Рис. 13. График участка ЛЧМ-теста: 1, 2 – границы отсчетов сигналов, формирующих входную матрицу

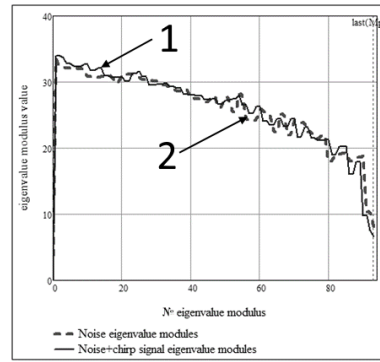


Рис. 14. Графики векторов сингулярных чисел, соответствующих рис. 13

На рис. 15 границы участка сигнальных отсчетов, формирующие матрицы сигнальных отсчетов, выбираются согласно нулевым значениям тестового сигнала, различающимся по фазе на π (180°). Конкретно размер матриц A и \tilde{A} равен 85 x 85 отсчетов (см. рис. 15), границы участка сигнальных отсчетов равны 0,452 с и 0,788 с. Числа обусловленности (6), определяемые вектором сингулярных чисел (рис. 16) соответственно для смеси отсчетов входных сигналов гидрофонов и тестовых сигналов и только отсчетов входных сигналов гидрофонов равны $\chi(\tilde{A}) = 8,817$ и $\chi(A) = 5,053$.

Определяемое в качестве дискриминирующего параметра их отношение равно $\frac{\chi(\tilde{A})}{\chi(A)} = 1,745$. Соответственно значения оценок чисел обусловленности (7) равны: $\chi'(\tilde{A}) = 2,009$, $\chi'(A) = 1,332$ и $\frac{\chi'(\tilde{A})}{\chi'(A)} = 1,508$.

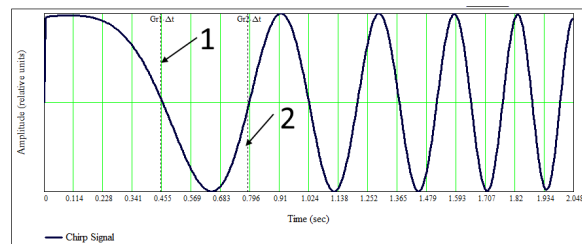


Рис. 15. График участка ЛЧМ-сигнала (1, 2 – границы отсчетов сигналов, формирующих входную матрицу)

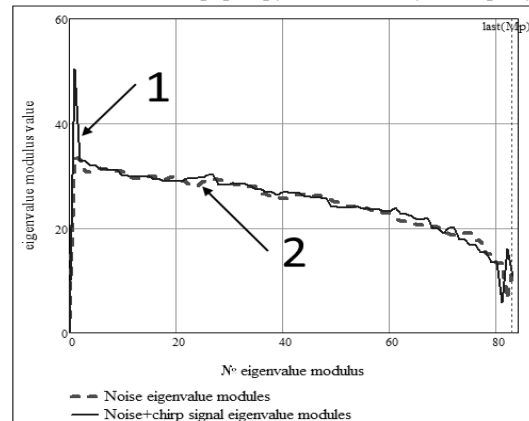


Рис. 16. Графики векторов сингулярных чисел, соответствующих рис. 15

Из рис. 11, 12 можно заметить, что графики сигналов и их спектров практически неразличимы. При этом отношение сигнал-шум сигналов этих рисунков (SNR) равно $-9,621$ дБ. Это позволяет приблизительно оценить чувствительность функции невязки, основанной на определении числа обусловленности. К сожалению, к настоящему моменту не удалось построить рабочую характеристику, иллюстрирующую чувствительность такой функции невязки в силу необходимости большого объема вычислений. Это авторы относят к следующему этапу работ. Но и приведенный предварительный анализ позволяет сделать вывод об эффективности функции невязки, реализованной на основе определения числа обусловленности.

Заключение

Результаты исследования приведенных в данной работе функций невязок, используемых в процедуре согласованной фильтрации гидроакустических сигналов, позволяет сделать следующие заключения:

- В условиях нестационарных гидроакустических шумов нелинейные нейроноподобные функции невязки имеют преимущество по отношению к традиционно используемым ковариационным.
- При использовании решеток гидрофонов для регистрации подводной обстановки перспективным методом реализации функции невязки для согласованной фильтрации гидролокационных сигналов является метод, основанный на сингулярном разложении матриц сигнальных отсчетов, высокая чувствительность которого обусловлена, по-видимому, когерентностью отсчетов лоцируемого сигнала при согласованном с его параметрами выборе анализируемого участка линейки гидрофонов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту № 20-19-00383 П.

Литература

1. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М. : Радио и связь, 1983. 320 с.
2. Hurst H.E. Long-term storage capacity of reservoirs. Transactions of American Society of Civil Engineers. 1951. V. 116. P. 770.
3. Hurst H.E., Black R.P., Simaika Y.M. Long-term storage: an experimental study. Constable. Лондон, 1965.
4. Маккалох Дж., Питтс У. Логические исчисления идей, относящихся к нервной деятельности // Автоматы. М. : ИЛ, 1956.
5. Хоботов А.Г., Хилько А.И., Яхно В.Г., Романова В.И. Обработка сложных сигналов нейроноподобными структурами // Нелинейная динамика в когнитивных системах : труды Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2011. С. 214–218.
6. Хоботов А.Г., Хилько А.И., Романова В.И. Использование нейросетевых структур свободной динамики с контекстно-зависимыми параметрами для наблюдения в неоднородных нестационарных средах // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. LVI, № 2. С. 104–124.
7. Хоботов А.Г., Калинина В.И., Хилько А.И. Исследование применения нейроноподобных функций для обработки локационных сигналов // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2021 : труды VII Всероссийской конференции. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2021. С. 180–182.
8. Khabotov A.G., Kalinina V.I., Khilko A.I. // Optical Memory and Neural Networks. 2021. V. 30, № 4. P. 327.
9. Khabotov A.G., Kalinina V.I., Khilko A.I., Malekhanov A.I. Novel neuron-like procedure of weak signal detection against the non-stationary noise background with application to underwater sound // Remote Sensing. 2022. 14(19):4860.
10. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Singular Value Decomposition. <http://www.haoli.org/nr/bookcpdf/c2-6.pdf> // Numerical Recipes in C. second edition. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0-521-43108-5.
11. Horn R.A. & Johnson Ch.R. Matrix Analysis, Cambridge University Press. 1985. ISBN 978-0-521-38632-6.

Схемная организация, нейронные коды и ментальные представления нейрокогнитивного интеллекта модели сетей с четным циклическим торможением

В.Д. Цукерман

Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского ЮФУ, Ростов-на-Дону,
vtsukerman17@yandex.ru

Перейти от непосредственного созерцания мира к когнитивным процессам воображения, ментальным представлениям и творчеству позволяет кратковременная рабочая память о сенсорном окружении. Какие структуры и механизмы, сопровождающие всю нашу жизнь, лежат в основе непрерывного «мета-обучения» и ментальной деятельности мозга? Как взаимодействуют представления памяти и вновь поступающих внешних сигналов в мозге? Каков язык (коды), формирующий ментальные представления объектов окружения? В докладе представлены три фундаментальных аспекта нейрокогнитивного интеллекта, реализованные в ранее опубликованной модели ЕСИ-сетей [1, 2]. Отметим при этом, что биологическим прототипом данной нейродинамической модели служат высокоуровневые структуры, а именно гиппокампальной формации, префронтальной и париетальной коры мозга, используемые в развитии представлений вышеуказанных аспектов нейрокогнитивного интеллекта.

Механизм спонтанного нарушения симметрии, приводящий к самоорганизующимся паттернам и дающий происхождение различных *форм пространственной структуры* в природе широко рассмотрен в обзоре [3]. Однако чисто самоорганизующиеся паттерны, возникающие в результате начальных или временных флуктуаций, по своей сути изменчивы. При их формировании стереотипное расположение, конкретные начальные или граничные условия, а также межклеточные взаимодействия или даже сами клетки могут вносить свой вклад в формирование градиента морфогенеза, что в итоге направляет формирование рисунка к *воспроизводимому результату*. В этой связи открытие решетчатых клеток (гексагональной сетки) в медиальной энторинальной коре в 2005 году явилось яркой иллюстрацией вышесказанного [4–7].

Связь между нейронами обычно запрещает многие состояния, сокращая пространство возможных сетевых представлений. С другой стороны, преимущество межклеточных связей заключается в том, что они могут в целом ряде случаев создать стабильные фиксированные точки (аттракторы) сетевой динамики, которые позволяют сети сохранять состояние после удаления входов намного дольше, чем постоянная времени отдельного нейрона. Часто мозг должен представлять непрерывные переменные. В этих случаях значение переменной может быть представлено в виде точки на непрерывном многообразии стабильных

фиксированных точек, названных *низкоразмерным непрерывным аттрактором* в сети [8].

Изучая энторинальные решетчатые клетки, Khona с соотр. показали спонтанное возникновение небольшого числа *дискретных пространственных и функциональных модулей* между непрерывно изменяющимися латеральными взаимодействиями, генерируемые гладкими кортикальными градиентами. Авторы разработали *аналитическую теорию модульности*, показав, что процесс является универсальным, а его надежность проистекает из топологических истоков и предсказывает последовательности соотношений периодов сетки [9]. Таких модулей оказалось шесть, причем это количество не зависело от числа клеток сети. Пример модулей, представляющих непрерывное многообразие, образованное низкоразмерным аттракторным состоянием сети, показан на рис. 1.

Идея непрерывных аттракторных сетей стала одной из самых влиятельных концепций в современной теоретической нейронауке. Низкоразмерные состояния генерируются автономно. В соответствии со всеми фундаментальными предсказаниями динамики непрерывного аттрактора эти результаты показали, что ответ каждого решетчатого модуля инвариантен в зависимости от среды, времени и поведенческих состояний; внутренне стабилизирован и генерируется автономно [10]. Важно, что теперь и крупномасштабное исследование с использованием регистраций нескольких сотен клеток прямо подтвердило теоретические предсказания динамики непрерывного аттрактора в отдельных модулях решетчатых клеток энторинальной сетки [11].

В 2002 году нами впервые были опубликованы результаты исследований нейродинамической модели осцилляторных сетей с четным циклическим торможением (ЕСИ-networks). В этой и последующих работах нашей лаборатории было показано формирование непрерывных аттракторных состояний сети в виде небольшого числа перекрывающихся ансамблей (модулей с различными масштабами и ориентацией решеток), а также возможность временного (фазового) кодирования событийных сигналов в этих сетях [13]. Дальнейшее развитие исследований ЕСИ-сетей привело к решению на их основе ряда проблем нейрокогнитивного интеллекта. Важнейший итог этих исследований нелинейной динамики ЕСИ-сетей – *непрерывное многообразие, образованное низкомерным аттракторным состоянием этих сетей* (рис. 2). Нейронные многообразия следует понимать как низкомерные представления событийных сигналов в активности

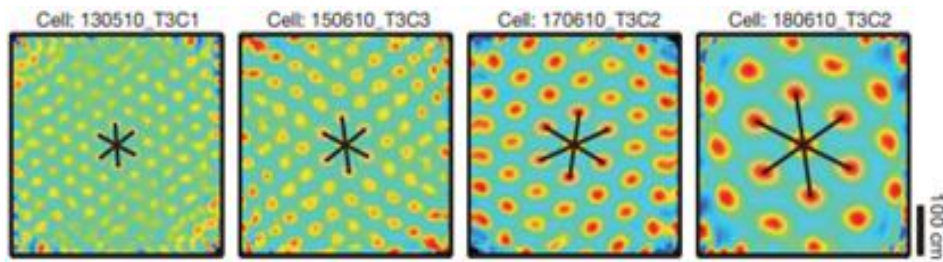


Рис. 1. Энторинальная решетчатая система. Шаг между энторинальными сетками зависит от ориентации сетки для всех трех осей в различных масштабах вдоль дорзовентрального направления у крыс. Клетки, выделенные красным цветом, относятся к одному и тому же сеансу записи. Обратите внимание на модульность ориентации и расстояния по [12]

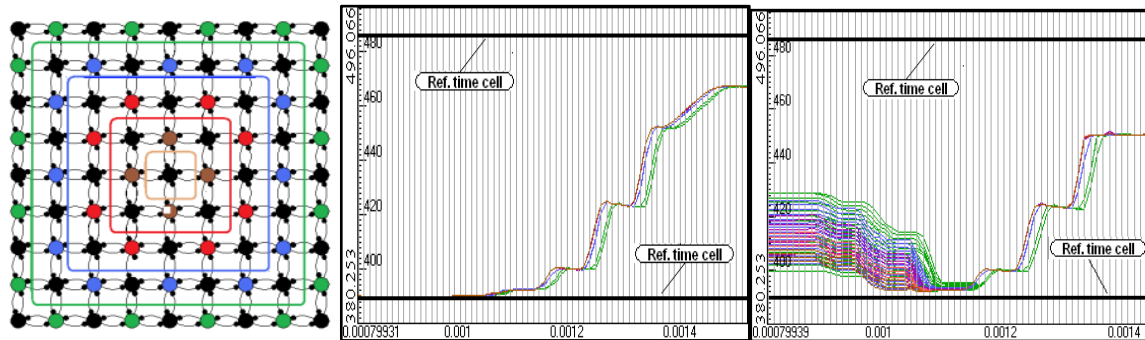


Рис. 2. Схема организации рекуррентных тормозных связей ЕСИ-сети (слева), непрерывное аттракторное многообразие в пространстве состояний ЕСИ-сети в ответ на общий контекстный вход трансляционной скорости (в центре) и сетевые фазовые ответы на комбинацию контекстного входа и градиентного сигнала угловой скорости на все информационные осцилляторы (справа). Разными цветами показаны ансамбли (модули) информационных единиц сети, черным цветом – субсеть референтных осцилляторов на схеме и горизонтальными черными линиями на графиках. Шаг амплитуды градиентного сигнала, распределенного между информационными единицами сети – $1 \cdot 10^{-5}$ и длительностью 3 усл. ед. вр.

нейронной популяции, реализованные в результате возникающей динамики. Кроме того, было показано, что в результате линейного векторного декодирования нейросетевых фазовых ответов можно получить семантические представления в двумерном евклидовом пространстве (рис. 3). Таким образом, представление информации в мозге по сути является изобразительным и может естественным образом формировать символическое ментальное пространство при поступлении внешних событийных сигналов на релевантном языке (коде) мыслей [1, 2].

В основе ментального нейронного кода лежит широко исследованная осцилляторная тета-гамма-фаза-амплитудная связь, при которой тета-впадины и пики выполняют разные функции: вызов рабочей памяти происходит во время пиков, тогда как кодирование – во время впадин [14–16]. На этой временной основе был разработан нейронный код для решения задач концептуального обучения и определено семантическое пространство, о котором докладывалось на предыдущей конференции [1]. В этом пространстве каждый концепт имел свой уникальный знак – суммарную величину межсобытийных временных интервалов, примеры которых представлены в презентации доклада. Важно отметить, что:

- а) коды периодические,
- б) функционально структурированные,

в) содержат стабильные и динамические части.

Следствием таких характеристик временных кодов является их гибкость и изоморфные представления каждого концепта рассматриваемой категории объектов (см. рис. 3).

Преобразование сенсорной информации в память происходит благодаря комбинации стабильных нейронов, сохраняющих во времени свою селективность к внешним событийным сигналам, и нейронов, которые во время процесса обучения инвертировали свою селективность с сенсорных периодов на временные периоды памяти. Такая временная динамика позволяла изменять нейросетевое представление посредством преобразования входных сигналов в рабочую память.

В ряде нейрофизиологических работ отмечалось, что вращательная динамика является эффективным механизмом для генерации ортогональных представлений, тем самым защищая память от сенсорного вмешательства [17, 18]. Интересно, что модельные эксперименты с ЕСИ-сетями показали, что вращательный механизм может не только защищать рабочую память от интерференции с сенсорными входами, но прогнозирует явное участие в генерации всей линейки концептов семантического пространства. Следовательно, комбинаторная динамика способствует смене (ротации) сетевых представлений, позволяя одной и той же сети нейронов эффективно представлять

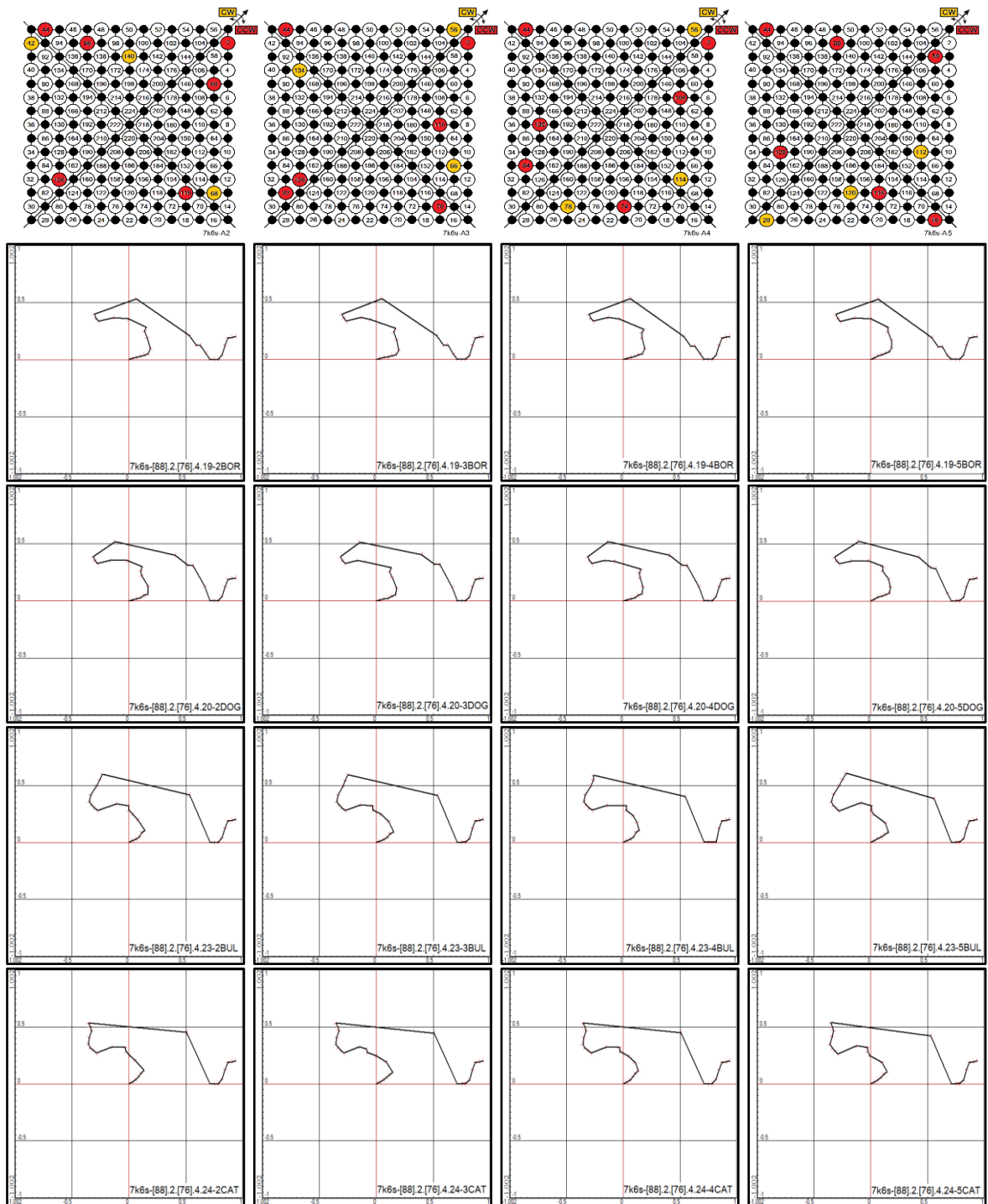


Рис. 3. Символьные ментальные представления концептов BOR, DOG, BUL и CAT в матрице памяти 7k ECI-сети. Изоморфные представления данных концептов (горизонтальные ряды) получены при вызове из памяти (декодировании) различных схем нейронов (верхний ряд), вместе с тем каждая из этих схем может представлять при декодировании все четыре концепта (вертикальные колонки) при соответствующем обучении сети входным временным рядом. Такой универсализм свидетельствует о высокой эффективности и надежности ECI-сетей в реализации функций кодирования и вызова из памяти ментальных представлений. Отметьте, что сумма временных интервалов, указанная внизу каждого из рисунков в обучающей последовательности CCW- и CW-событий, является уникальным ключом для каждого концепта

как сенсорную информацию, так и кратковременную память.

Подчеркнем, что такая возможность определяется схемной организацией модели ECI-сетей с наглядным способом вращений вокруг вертикальной оси, проходящей через точку пересечения диагоналей схемы.

На рис. 3 показана комбинация двух экспериментальных серий обучения 7k ECI-сети: в первом случае – частным концептам BOR, DOG, BUL и CAT с соответствующей кодовой временной последовательностью, указанной внизу каждого горизонтального ряда; во второй серии – частным концептам с временными последовательностями,

указанными внизу вертикальных колонок изображений. Вызов из памяти осуществлялся в соответствии со схемами рекрутирования нейронов, показанных в верхнем ряду рис. 3. Видно, что изоморфные представления концептов могут быть получены разными схемами нейронов при вызове из памяти, как показано в горизонтальных рядах рис. 3. В то же время каждая из этих схем вызова из памяти демонстрирует различные символичные представления концептов, показанных в вертикальных колонках. Число таких схем, как и концептов, может быть значительно больше представленных на данном рисунке и ограничивается числом обучающих входных данных. Показанные примеры свидетельствуют о том, что одни и те же ансамбли нейронов могут представлять *различные концепты* (вертикальные колонки). И, наоборот, многочисленные ансамбли (малые группы распределенных нейронов сети) могут представлять *изоморфные изображения одних и тех же концептов* (горизонтальные ряды). Такой универсализм свидетельствует о высокой эффективности и надежности ЕСИ-сетей в реализации функций кодирования и вызова из памяти ментальных представлений. Как легко заметить, выбор распределенных групп нейронов, представляющих различные концепты в данных экспериментах, был ограничен двумя билатерально расположенными относительно главной диагонали сети информационными единицами в первых трех внешних контурах (модулях) сети – это и есть правило рекрутирования нейронов при вызове из памяти низкомерных представлений концептов. Однако подчеркнем, что нейродинамические вычисления необходимо интерпретировать в терминах коллективной динамики в пространстве состояний совместной активности всех нейронов сети.

Заключение

Во время естественного поведения наш мозг постоянно взаимодействует со сложным и динамичным окружением, которое вынуждает его формировать ментальные представления, помогающие решать сложные проблемы поведения и творческой деятельности. В чем смысл структурированных низкомерных представлений, создаваемых ЕСИ-сетями? Изучение структуры представлений и построение моделей подчеркивают необходимость раскрытия процессов обучения, приводящих в итоге к структурированным представлениям в мозге. В этой связи в настоящем исследовании рассмотрены три составные части этого сложного процесса: от самоорганизации решетчатой системы клеток энторинальной коры в развитии восприятия пространственного окружения к тета-гамма-фазовому кодированию событийных сигналов и, наконец, к формированию ментальных символических представлений, генерируемых с участием различных аспектов единой распределенной динамической системы мозга. Одним из ключевых качеств мета-обучения или обучения учиться является то, что оно происходит в нескольких мас-

штабах, как с точки зрения времени, так и со стороны абстракции. Фундаментальный принцип мета-обучения заключается в том, что обучение протекает быстрее с большим опытом, путем приобретения индуктивных знаний, которые позволят более эффективно учиться в будущем, что является перспективным направлением исследований.

Литература

1. Цукерман В.Д. К творческому познанию: креативные начала реляционных нейронных сетей с четным циклическим торможением // Тр. VII Всероссийской конф. НДКИ-2021. Н. Новгород, ИПФ РАН, 2021. С. 186–189.
2. Цукерман В.Д. Нейродинамическая модель творческого познания реляционных сетей с четным циклическим торможением // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 331–357.
3. Schweisguth F., Corson F. Self-organization in pattern formation // *Develop. Cell*, 2019. V. 49. P. 659–677.
4. Hafting T. et al. Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex // *Nature*. 2005. V. 436 (7052). P. 801–806.
5. Burak, Y., Fiete, I.R. Accurate path integration in continuous attractor network models of grid cells // *PLoS Comput. Biol.*, 2009. 5(2): e1000291.
6. Couey J.J. et al. Recurrent inhibitory circuitry as a mechanism for grid formation // *Nat. Neurosci.* 2013. V. 16 (3). P. 318–324.
7. Jacobs J. et al. Direct recordings of grid-like neuronal activity in human spatial navigation // *Nat. Neurosci.* 2013. V. 16. P. 1188–1190.
8. Yoon K. et al. Specific evidence of low-dimensional continuous attractor dynamics in grid cells // *Nat. Neurosci.* 2013. V. 16. P. 1077–1084.
9. Khona M. et al. Spontaneous emergence of topologically robust grid cell modules: a multiscale instability theory // *bioRxiv*. preprint. 2021.
10. Khona M., Fiete I.F. Attractor and integrator networks in the brain // *Nat. Rev. Neurosci.* 2022. V. 23. P. 744–766.
11. Gardner R.J. et al. Toroidal topology of population activity in grid cells // *Nature*. 2022. V. 602. P. 123–128.
12. Tensola H. et al. The entorhinal grid map is discretized // *Nature*. 2012. V. 492. P. 72–78.
13. Цукерман В.Д., Чешиков Г.Н. Основы нелинейной динамики сенсорного восприятия. I. Фазовое кодирование в осцилляторных сетях с четным циклическим торможением // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2002. № 7–8. С. 65–72.
14. Lisman J.E., Jensen O. The theta-gamma neural code // *Neuron*, 2013. V. 77. P. 1002–1016.
15. Colgin L.L. Theta-gamma coupling in the entorhinal-hippocampal system // *Curr. Opin. Neurobiol.*, 2015. V. 31. P. 45–50.
16. Lega B. et al. Slow-theta-to-gamma phase-amplitude coupling in human hippocampus supports the formation of new episodic memories // *Cer. Cortex*, 2016. V. 26. Art. 23176.
17. Spaak E. et al. Stable and dynamic coding for working memory in primate prefrontal cortex // *J. Neurosci.* 2017. V. 37. P. 6503–6516.
18. Libby A., Buschman T.J. Rotational dynamics reduce interference between sensory and memory representations // *Nat. Neurosci.* 2021. V. 24. P. 715–726.
19. Wang J.X. Meta-learning in natural and artificial intelligence // *arXiv*: 2011.13464v1 [cs.AI] 26 Nov. 2020.

Актуальные задачи изучения психофизиологии восприятия архитектурно-пространственной среды городского пространства

О.Н. Чеберева, В.Д. Молоснова

Нижегородский архитектурно-строительный университет, chebereva@mail.ru
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Процесс восприятия архитектуры и организованного ею пространства происходит по закономерностям, характерным для восприятия художественного произведения и включает в себя три понятия: «субъект восприятия (человек, обладающий потребностями, мотивацией, когнитивными функциями, психологическими и физиологическими особенностями), объект восприятия (носитель информации) и способ их взаимодействия, который сам становится полноценной системой со своими характерными принципами развития, формами взаимосвязи, информационной насыщенностью, где они функционируют уже как части этого системного целого» [1].

Интересно в ракурсе психологии трактует базовые требования к «эталонному» пространству в соответствии с пирамидой потребности А. Маслоу архитектор Н. Иваницкая: «безопасность, связь и гармония являются главными характеристиками эталонного пространства». Безопасность как характеристика пространства связана с утилитарными и психологическими характеристиками оболочки-границы. Художественное осмысление пространства является признаком психологической безопасности и не может осуществляться в агрессивной среде. Ю.С. Янковская также трактует основное содержание архитектурной формы как континуум пределов «преграда/стимул» [2].

Следующей за безопасностью проявляется потребность в принадлежности, соединенности, изолированности, ощущении связи. Отсутствие чувства принадлежности, идентичности вызывает в человеке страдание и побуждает к активному поиску удовлетворения этой потребности: «когда на первом плане был голод, любовь казалась нереальной, ненужной и неважной. Теперь же острая боль от одиночества, остракизма, неприятия, недружелюбия и неприкаянности превосходит все остальное» [3]. В искусстве и архитектуре понятие формы, в том числе пространственной, часто относится к формальной структуре – способу расположения и сочетания элементов и частей композиции, составляющих единое целое. В контексте вышеизложенного понятие формы относится и к внутренней структуре, и к внешнему силуэту, и к принципу единого целого. Но в этой связи теория формальной композиции до сих пор недалеко ушла от дискуссий вокруг двух основных факторов воздействия формы на человека, выявленных еще в экспериментальной эстетике Г.В. Фехнера [4] – **ассоциативного** и **прямого**, собственно, **формального**, связанного непосредственно с восприятием геометрии формы (которое в некотором

пределе можно приравнять к симультанному), а также формально-композиционных признаков и свойств, выявленных психоаналитическим методом Н. Ладовского [5].

Со времени Б.М. Величковского («Психология восприятия», 1973), даже если форма имеет вид трехмерной объемной массы, контур принимается главным определяющим аспектом формы: это геометрическая конфигурация, взаимосвязанное расположение точек (каркасы соотнесенных точек, вплотную связанные с математической теорией групп), а также линий и очертаний фигур (контуров) в структуре формы. Термин «архитектоника» в теории композиции часто обозначает интегральный характер взаимосвязи концептуального содержания и *тонических составляющих* формальной структуры архитектурной формы или пространства искусственной среды жизнедеятельности, и связан с характеристиками статичности, устойчивости либо динамической направленности структуры формы.

В настоящее время устоявшееся выражение «архитектура пространства» стало общепризнанным, но ни в теории архитектуры, ни в культурологии, ни в эстетике исследователи не ставили перед собой задачи определить, что же такое архитектурное пространство. Данная проблематика становится все более актуальной в искусственно созданной среде больших городов, архитектурное пространство является частью комфортного жизненного пространства человека. К настоящему времени проведено огромное, казалось бы, количество исследований в области теории композиции архитектурного пространства, которая базируется на психофизиологии восприятия. Опубликовано большое количество научных работ по теории композиции и теории архитектурного формообразования, однако основная масса носит качественный и феноменологический характер, сопряженный скорее с философией, нежели физиологией. Такие исследования представляют собой, по сути, экспертные оценки проблематики специалистами узкого профиля, имеющими исключительную насмотренность и осведомленность в рассматриваемых вопросах. Их восприятие пространства, в том числе архитектурного пространства может и должно существенно отличаться от восприятия среднестатистического испытуемого в исследованиях психофизиологического или нейропсихологического плана. К наиболее глубоким, использующим исследования психофизиологов или эксперименты психологов, относятся работы архитекторов и дизайнеров

А.В. Степанова [6], А.В. Шаповала [7], Е.А. Мартемьяновой [8], А.В. Крашенинникова [9], Ю.С. Янковской [2].

В то же время исследования, касающиеся восприятия пространства и его структурно-геометрических характеристик, которые полностью попадают в область интереса архитекторов-специалистов и сущностно необходимы для активизации положений психологии восприятия и теории архитектурного формообразования, набирают обороты в зарубежной практике исследований т. н. «нейронаук для архитектуры». Они проводятся мультидисциплинарными командами, состоящими как из специалистов в области психофизиологии и нейробиологии, программирования, так и лиц, имеющих архитектурное образование, и проводятся чаще всего в среде VR, так как традиция презентации сенсорного стимульного материала в виде фото, видео и VR напрямую сопряжена с возможностями измерительной аппаратуры.

Наиболее предметным с точки зрения физиологической объективизации основ восприятия пространства и его геометрических характеристик, полно представленным в печати, в том числе в научных реферируемых журналах по архитектуре, представляется опыт команды А. Шемеш (рис. 1). Команда А. Шемеш [10] приняла во внимание почти онтологически полный предшествующий опыт значительного числа исследователей и практически весь пласт инструментальных методик, доступных физиологам и нейробиологам от ФМРТ до кожно-гальванической реакции, и учитывала даже опыты с пространственной ориентацией мелких грызунов.

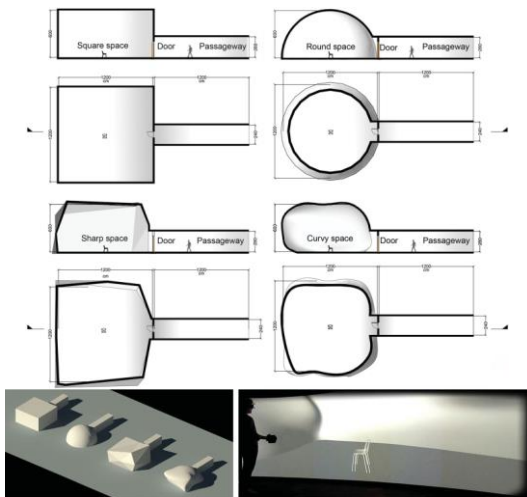


Рис. 1. Стимульный материал в эксперименте А. Шемеш и др., 2021

Исследования А.В. Шаповала касаются теории формальной композиции в области промышленного дизайна приборных панелей с максимальной степенью эргономичности восприятия и взаимодействия. По времени проведения и содержанию близки и продолжают русло экспериментальных исследований Б.М. Величковского [11]. Проблемы распределения ландшафта внимания, или, по вы-

ражению А.В. Шаповала, «кортежа зрительного восприятия» прицельно изучались в лабораторных условиях, но затрагивали в основном сочетания простых сенсорных признаков (рис. 2), таких как цвет, фактура, текстура, размер и т. п. В определенном смысле между областями значений терминов «формальная композиция» и «схема симультанного восприятия» можно поставить знак равенства.



Рис. 2. Первичные, вторичные формально-композиционные свойства и критерии гармонической оптимальности как средства связи морфологической и образной структур архитектурной формы

В исследовании эргономики приборных панелей комбинаторные сенсорные признаки (они же по терминологии А.В. Шаповала, [7] – «простые свойства» формальной композиции (восприятия) затрагивались в гораздо меньшей степени, в русле динамики, статики, ориентации, членений, группировки и т. д. С учетом того, что изучалось проектирование танков, в частности кабины, рассмотрение проблемы масштаба и уровневой структуры восприятия носит выражено измельченный специфический характер, не применимый для создания рекомендации по специфически архитектурному либо архитектурно-дизайнерскому и средовому проектированию. В исследованиях Ю.С. Янковской уделяется внимание последовательности формирования образа пространства, однако эмоциональная оценка этого образа подразумевается в качестве некоторого результата, итога восприятия, а не непосредственно сопутствующего восприятию и формированию когнитивной интерпретации пространства процесса. В исследовании Е.А. Мартемьяновой [8] несколько смешаны восприятие формально-композиционных свойств человеком, которые подразумеваются как врожденные свойства восприятия, и компьютерное зрение, которое рассматривается как инструмент, позволяющий оценить некоторые формально-композиционные свойства проектируемого объекта уже в процессе проектирования. То есть не производится и не ставится задача стандартизации и верификации разницы восприятия и оптической репрезентации объекта в разных системах распознавания объекта при непосредственной эмоциональной оценке человеком и при оценке с помощью заданных компьютерному зрению характеристик.

Встает вопрос, что объективность этих исследований будет напрямую зависеть от разницы восприятия пространств с одними и теми же структурно-геометрическими характеристиками,

но разными оптико-визуальными репрезентациями.

Актуально сопоставление параметров восприятия разных оптико-визуальных видов репрезентаций, в том числе ставится цель сравнения разницы вегетативных отображений разных типов репрезентаций архитектурных пространств.

Также стоит задача выявления степени взаимосвязи ландшафта внимания и вегетативных отображений физиологического воздействия оптико-визуальных репрезентаций архитектурных пространств с одинаковыми структурно-геометрическими характеристиками на функциональное состояние человека. Данное состояние, как в полевых условиях, так и в условиях лабораторного эксперимента, может оцениваться по методике событийно-связанной телеметрии с опорой на исследования Р.М. Баевского [12–16]. Методика подходит для изучения восприятия, так как датчик телеметрии вариабельности сердечного ритма не отвлекает испытуемого.

Таким образом, значимым объектом исследования может стать взаимосвязь ландшафта внимания и функционального состояния человека при восприятии (перцепции) различных репрезентаций архитектурного пространства (визуализация и фотографии, реальность и 3D видео в среде VR) с прицельным опосредованным вниманием к возможностям исследования сложных композиционных признаков – таких, как устойчивость, связность и масштаб. При этом исследование будет иметь существенную научную новизну и теоретическую значимость за счет сопоставления параметров восприятия разных оптико-визуальных видов репрезентаций, в том числе ставится цель сравнения разницы вегетативных отображений в среде VR и реальности, открывая путь для других прикладных исследований, имеющих даже более практико-ориентированное значение в области архитектуры.

Особый вопрос – подбор входных тестов, например, на холистичность или аналитичность восприятия. Есть мнение, что проектное мышление формирует интуитивное стремление к холистичности, при этом основной метод субъективной оценки валентности эмоций испытуемого «Self-Assessment Manikin» [17] (SAM) данных; оценка распределения ландшафта внимания может производиться на стационарном, мобильном и встроенном в VR шлем ай-трекере.

Литература

1. *Ивановская Н.* Поиск эталонного пространства. Психологические особенности восприятия архитектуры и дизайна как художественной среды // «Архитектура, градостроительство и дизайн». № 3. 2017.

2. *Янковская Ю.* Архитектура городской среды. Образ и морфология. Учебное пособие. СПб. : Лань. 2023.

3. *Маслоу А.* Мотивация и личность. 3-е изд. СПб. : Питер. 2019. 400 с.

4. *Фехнер Г.Т.* Из книги «Введение в эстетику» (перевод Л.А. Мелимида) // Фехнер Г.Т. в сб. Искусствоведение: методы точных наук и семиотики / Сост. и ред. Ю.М. Лотмана, В.М. Петрова. Изд. 3-е. М. : Издательство ЛКИ. 2008. С. 326–330.

5. *Хан-Магомедов С.О.* Психоаналитический метод Н. Ладовского – основа пропедевтической дисциплины «Пространство» во ВХУТЕМАСе-ВХУТЕИНе / С.О. Хан-Магомедов // Техническая эстетика. 1982. № 4. С. 27–32.

6. *Степанов А.* Очерки риторики и поэтики архитектуры / А. Степанов. М. : Новое литературное обозрение. 2021. 704 с.

7. *Шаповал А.В.* Теория формальной композиции: учебное пособие для вузов / А.В. Шаповал. Казань: «Дизайн-квартал». 2016. 175 с.

8. *Мартельянова Е.А.* Метод анализа структуры формы объектов предметно-пространственной среды. Автореферат диссертации на соискание степени кандидата наук. На правах рукописи. ФГБОУ ВО РГУ им. А.Н. Косыгина. Москва. 2019.

9. *Крашенинников А.В.* Градостроительное развитие и городская среда / Open Science Publishing Raleigh. North Carolina, USA, 2017. 169 с.

10. *Шемеш А., Лейсман Дж., Бар М. и Гробман Я.Дж.* // Нейрокогнитивное исследование эмоционального воздействия геометрических критериев архитектурного пространства (перевод авт.) // Architectural Science Review. 2021. 64:4. Р. 394–407.

11. *Величковский Б.М.* О роли пространственных систем отсчета в восприятии собственного и объектного движения // Вопросы психологии. 1973. Т. 19 (2). С. 15–25.

12. Методы и приборы космической кардиологии на борту Международной космической станции. Монография / [под ред. Р.М. Баевского, О.И. Орлова]. Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН. Москва : Техносфера. 2016. 368 с.

13. *Parin S.B., Vetyugov V.V., Bakhchina A.V., Polevaya S.A.* The role of the endogenous opioid system in the control of heart rate variability under cognitive loads of various levels. *Sovremennye tehnologii v medicine.* 2014; 6(4): 116–126.

14. *Бахчина А.В.* Динамика вегетативной регуляции кардиоритма при когнитивных, эмоциональных и физических нагрузках. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата психологических наук.

15. *Polevaya S.A., Runova E.V., Nekrasova M.M., Fedotova I.V., Bakhchina A.V., Kovalchuk A.V., Shishalov I.S., Parin S.B.* Телеметрические и информационные технологии в диагностике функционального состояния спортсменов // Современные технологии в медицине. 2012. № 4. С. 94–98.

16. *Полевая С.А., Еремин Е.В., Буланов Н.А., Бахчина А.В., Ковальчук А.В., Парин С.Б.* Событийно-связанная телеметрия ритма сердца для персонализированного дистанционного мониторинга когнитивных функций и стресса в условиях естественной деятельности // СТМ. 2019. Т. 11, № 1. С. 109–115.

17. *Bradley M., Lang P.J.* Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential // M. Bradley, P.J. Lang / B&W Thu. & Exp. Pschchar. 1994. V. 25, № I. P. 49–59.

К вопросу о возможности цифрового воссоздания личности (Digital Immortality)

О.Д. Чернавская

Физический институт РАН, Москва,
olgadmitcher@gmail.com

Проблема воссоздания личности при помощи цифровых технологий («цифровое бессмертие») стала популярной в начале 2000-х и остается актуальной до сих пор. Существует ли такая возможность на самом деле? Следует различать «бессмертие для себя» и «бессмертие для близких». Мы приводим аргументы в пользу того, что первая цель не имеет смысла, а к достижению второй можно подойти достаточно близко. Для этой цели следует определить, что есть личность. Данная проблема обычно обсуждается на уровне философии, психологии и т. д., мы же предлагаем рассмотреть ее на «инженерном» уровне: *как* это сделать? С этой точки зрения следует выделить наиболее яркие черты данной личности и попытаться реализовать их в рамках какой-либо нейроморфной модели. Мы работаем с когнитивной архитектурой NCCA (Natural Constructive Cognitive Architecture). Основная отличительная особенность данной модели состоит в том, что вся система разделяется на 2 связанные подсистемы (по аналогии с полушариями человеческого мозга). Одна из них ответственна за обучение, генерацию информации и креативность; здесь обязательно присутствие шума (случайное самовоз-

буждение нейронов). Вторая подсистема служит для обработки и консервации полученной информации (шум излишен). Ключевым элементом «креативной» подсистемы является специальный нейропроцессор Хопфилдовского типа, в котором записываются и сохраняются (при помощи слабых «серых» связей) все, даже случайные, смутные и неясные образы, полученные за все время обучения. Показано, что этот процессор может рассматриваться как аналог подсознания. Содержимое человеческого подсознания может проявляться в виде субъективных, неявных и неожиданных, ассоциаций, оговорок, ошибок и т. д. Именно эти проявления дают наиболее ценную информацию для воссоздания данной личности. Самое сложное – воссоздать «эмоциональный портрет» личности, передать его эмоциональное воздействие на окружающих. Однако здесь ключевую роль может играть эмоциональная окраска его высказываний, выраженная в мимике, жестах, смехе и т. д. В данной работе мы приводим аргументы в пользу того, что такая программа дает возможность создания «виртуальной личности», которая могла бы дать иллюзию общения с живой.

Сознание и возможности его экспериментального изучения

Т.В. Черниговская

Институт когнитивных исследований СПбГУ,
t.chernigovskaya@spbu.ru

Проблема сознания не перестаёт быть в центре интереса разных наук уже не первое столетие. Это понятно, потому что она имеет не только научную, а экзистенциальную ценность: человек хочет понять, кто он, чем принципиально отличается (если отличается) от других существ и каково в таком случае его место в мире и обязанности по отношению к этому миру. Меж тем нет никакого, даже минимального согласия об определении сознания – ни в науке, ни в философии, что делает его экспериментальное изучение крайне подударным. Ясно, что без разработки теории сознания и

более того – теории мозга дело не продвинется, хотя исследования ведутся на большом спектре живых существ, включая и относительно простые виды.

Вопрос этот обретает и ещё одно измерение: принципиальная возможность появления сознания у небиологических объектов, например, у нейросетей последних поколений.

Таким образом, предлагаемая тема имеет не просто научную, но и философскую, мировоззренческую важность.

Математические аспекты интеллектуально-информационной системы переработки сырья в сахарном производстве

А.И. Эгамов¹, П.Н. Бураго²

¹ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород; albert810@yandex.ru

² ННГУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород; burago.pasha@yandex.ru

При общей мировой цифровизации экономики предприятиям необходимы автоматизация и оптимизация всех затрагивающих обработку сырья процессов, которые помогут снизить себестоимость продукции и одновременно увеличить выход конечного продукта. Это в полной мере относится и к предприятиям Агропромышленного комплекса (АПК) нашей страны. Возьмем, например, сахар, его роль в повседневной жизни довольно-таки велика [1]. Во всех странах мира сахар является стратегическим продуктом. Кроме того, производство сахара весьма энергозатратно [2]. Поэтому для этой отрасли, как ни для какой другой, актуальна разработка информационно-интеллектуальных систем (ИИС). Основные цели ИИС: используя математическое моделирование в экономике, провести анализ экономических активов и функций; прогнозировать развитие экономических процессов; принимать управленческие решения [3], и, кроме того, проводить количественные и качественные измерения различных компонентов на всех этапах переработки сырья для повышения качества продукции на выходе производства. Причем важно проводить мониторинг компонентов в процессе переработки и использовать его результаты на всех основных стадиях производства сахара: диффузионном извлечении свекольного сока из сырья, очистке, выпаривании и кристаллизации. Всего этого можно достичь, только если вначале составить экономико-математическую модель и с допустимой погрешностью получить решение теоретически, таким образом, расширить основы, на которые опирается ИИС для обработки исходных данных и получения лучшей стратегии для процесса переработки при соответствующих параметрах перерабатываемых партий.

В ННГУ им. Н.И. Лобачевского выполняется НИОКР на тему «Создание высокотехнологичного производства сахара на базе АО «Сергачский сахарный завод»» от правительства РФ. В рамках получения теоретических основ для ИИС рассматривается следующая математическая модель. Разные сорта (партии) сахарной свеклы имеют, вообще говоря, различную производственную ценность (долю сахара в корнеплодах). За время хранения по-разному ее теряют, поэтому последовательность переработки партий (план переработки) влияет на вход конечного продукта, а значит, при прочих равных условиях и на выход продукта, который желательно максимизировать. Оптимальный график переработки партий сырья может су-

щественно повысить итоговый выход конечного продукта [4–6].

Выход готового продукта (сахара) зависит от многих параметров: от процентного содержания грязи на свекле, содержания нитратов, повреждений при транспортировке на переработку, температуры обработки и так далее. Но, тем не менее, основное влияние на выход конечного продукта оказывает процентное содержание сахарозы. В настоящей статье не учитываются менее значимые процессы, которые описываются в более сложных математических моделях, отрицательно воздействующие на выход сахара, а именно, наличие неорганических веществ [7] и различных болезней корнеплодов. В рассматриваемой математической модели процесс дозаривания [8] также не учитывается.

В начале исследования в качестве стратегий переработки использовались только жадная и бережливая стратегии. Было доказано, что каждая из них является оптимальной при некотором наборе параметров партий сырья и, кроме того, при близких параметрах распределения – квазиоптимальной. Далее введены как в теоретическое, так и в практическое рассмотрение более сложные стратегии, например, комбинации базовых – жадно-бережливая и бережливо-жадная стратегии. В данной работе для каждой из них находятся условия на параметры партий, при которых они становятся оптимальными. Эта информация полезна как с теоретической, так и с практической точки зрения в качестве неких базовых вариантов для ИИС.

Математическая модель и оптимизационная задача

Имеются n партий сахарной свеклы, занумерованных от 1 до n , равной массы и различной сахаристости. Масса одной партии свеклы равна M – это масса, которую производственные мощности предприятия могут переработать за определенный промежуток времени (например, за одни сутки). Обозначим производственную ценность – долю содержания сахара в одном килограмме свеклы (сахаристость) i -й партии свеклы – a_i , $i = \overline{1, n}$. Для переработки n партий сырья необходимо n этапов (периодов), занумеруем их от 1 до n . Пусть за время хранения i -я партия свеклы теряет некоторую долю своей производственной ценности (снижается сахаристость свеклы) и к j -му этапу переработки ее сахаристость равна p_{ij} .

Таким образом, генерируется матрица P порядка $n \times n$ с элементами p_{ij} , $p_{i1} = a_i$.

Тогда вход сахарозы после завершения всех этапов будет равен значению целевой функции, которую запишем в виде

$$S = \sum_{i=1}^n p_{\sigma(i)i}, \quad (1)$$

где σ – перестановка натуральных чисел от 1 до n , соответствующая порядку переработки партии сырья. Выход сахара после завершения всех этапов будет равен $M \cdot S$.

Обозначим b_{ij} – коэффициент деградации, определяющий увядание, потерю влаги, снижение сахаристости и т. п. i -й партии свеклы на j -м этапе, $b_{ij} = p_{i,j+1} / p_{ij}$, $j = \overline{1, n-1}$. Нетрудно видеть, что $p_{ij} = a_i b_{i1} \cdot \dots \cdot b_{ij-1}$, $j = \overline{2, n}$. В этих обозначениях целевая функция S запишется в виде

$$S = a_{\sigma(1)} + \sum_{i=2}^n \left(a_{\sigma(i)} \prod_{j=1}^{i-1} b_{\sigma(i)j} \right). \quad (2)$$

Задача поиска оптимального расписания переработки партий сахарной свеклы сводится к нахождению такой перестановки σ , для которой значение функции S (см. формулу (1) или эквивалентную ей формулу (2)) будет максимальным.

Методы решения

Если решать представленную к изучению задачу «в лоб» методом полного перебора, следует вычислить и сравнить $n!$ значений целевой функции. Нетрудно видеть также, что она относится к задачам линейного программирования и, значит, может быть решена симплекс-методом. Однако трактовка задачи может быть следующей: из каждой строки матрицы P выбрать ровно по одному элементу так, чтобы в каждом столбце находился только один из выбранных элементов, а сумма выбранных элементов была максимальной. Таким образом ее можно свести к известной задаче дискретной оптимизации – задаче о назначениях. Задача о назначениях является частным случаем транспортной задачи. Специфика задачи позволяет использовать менее трудоемкие методы. При известной матрице P в качестве основного метода для решения задачи о назначениях применяется венгерский алгоритм [9]. Также для ее решения, можно, например, использовать схожий алгоритм Мака.

«Венгерский алгоритм» имеет полиномиальную сложность $O(n^4)$, может найти как максимальное, так и минимальное значение целевой функции, а также экстремальные планы переработки, присутствует в стандартных библиотеках алгоритмического языка «Python». Однако его применение возможно, если иметь полную и точную информацию о параметрах всех партий в самом начале переработки до первого этапа, т. е.

априори должны быть известны либо все элементы матрицы P , либо все начальные сахаристости a_i и все коэффициенты деградации b_{ij} каждой партии за все периоды времени, в том числе коэффициенты деградации, которые бы имели место для уже переработанных к этому периоду партий. Понятно, что на практике такое неосуществимо. Чтобы не зависеть от точного знания всех параметров априори, в ряде работ рассматривают интервальную задачу о назначениях (см., например, [10]). В настоящей работе предлагается провести серию экспериментов, в каждом из которых выбираются параметры партий из допустимых диапазонов, считая, что распределение параметров в них равномерно, тем самым «заполняя» матрицу P . Далее получить усредненное (среднее арифметическое) значение целевой функции для каждой стратегии и сравнить с усредненным абсолютным максимумом, который находится с помощью венгерского алгоритма. Под стратегией понимается обоснованный выбор какой-либо партии на переработку в начале каждого этапа переработки. Целью задачи, таким образом, будет нахождение эвристических алгоритмов, являющихся квазиоптимальными, если допустимые диапазоны удовлетворяют некоторым известным априори условиям. Пусть натуральное число ν удовлетворяет неравенствам $[n/4] \leq \nu \leq [n/2]$. Исследовались следующие стратегии переработки партий сахарной свеклы:

- *жадный алгоритм* (на каждом этапе для переработки выбирается партия, имеющая в его начале наибольшую сахаристость среди всех оставшихся, претендующих на обработку);
- *бережливый алгоритм* (на каждом этапе для переработки выбирается партия, имеющая в его начале наименьшую сахаристость среди всех оставшихся, претендующих на обработку);
- *бережливо-жадный алгоритм* (при фиксированном натуральном ν на переработку в первые $\nu-1$ этапов партия для обработки выбирается при руководстве бережливым алгоритмом, в остальные этапы – жадным);
- *жадно-бережливый алгоритм* (при фиксированном натуральном ν на переработку в первые $\nu-1$ этапов партия для обработки выбирается при руководстве жадным алгоритмом, в остальные этапы – бережливым);

С помощью венгерского алгоритма находится максимум целевой функции, который необходим для сравнения со значениями целевой функции других стратегий.

Оказывается [4–6], при некоторых интуитивно понятных ограничениях на параметры a_i и b_{ij} имеются несложные эвристические стратегии переработки партий, которые необходимо заложить в основы ИИС для получения квазиоптимальных планов для переработки сахарной свеклы.

Рассматривались 2 стратегии – жадная и бережливая. Эти стратегии дают оптимальный план

переработки в двух принципиальных частных случаях, когда коэффициенты деградации зависят не от двух параметров, а только от одного. Информация об условиях, которые при этом накладываются на параметры партий сырья, представлена в *теореме 1*.

Теорема 1 [4].

1. Если все начальные сахаристости a_i различны и коэффициенты деградации зависят только от номера этапа $b_{ij} = \bar{b}_j$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n-1}$, оптимальной является жадная стратегия.
2. Если коэффициенты деградации зависят только от номера партии (условие а) и, кроме того, выполняются условия б и с (см. ниже), оптимальной является бережливая стратегия:
 - а) $b_{ij} = b_i$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n-1}$;
 - б) все a_i одинаковы;
 - в) $\min b_i \geq \frac{n-2}{n-1}$.

На основе теоремы 1 выводятся теоремы 2 и 3.

Основной результат

Представим в виде теорем условия, при которых *жадно-бережливая стратегия и бережливо-жадная стратегия будут оптимальными*.

Теорема 2 о жадно-бережливой стратегии

Пусть нумерация партий осуществлена так, что выполняются следующие неравенства:

- 1) $a_1 > a_2 > \dots > a_{v-1} > a_v = a_{v+1} = \dots = a_n$;
- 2) $b_{ij} = \bar{b}_j$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, v-1}$;
- 3) $b_{ij} = b_i$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{v, n}$;
- 4) $\frac{n-2}{n-1} \leq b_v$;
- 5) $b_1 < b_2 < \dots < b_v < \dots < b_n$.

Тогда при данных параметрах партий жадно-бережливая стратегия является оптимальной.

Доказательство. Назовем партии с нумерацией от 1 до $v-1$ партиями первой категории, а с нумерацией от v до n – партиями второй категории. Так как $[n/4] \leq v \leq [n/2]$, то $v-1 \leq [n/2]$ и, значит, партий первой категории меньше или столько же, чем партий второй категории.

Предположим, что в оптимальном плане хотя бы одна партия первой категории с номером q стоит на переработку под номером m , $m \geq v$, тогда какая-то партия второй категории с номером r имеет в оптимальном плане номер k , $k \leq v-1$. Обозначим S^* – значение целевой функции для оптимального плана, а $S_{k \leftrightarrow m}^*$ – значение целевой функции плана, отличающегося от оптимального плана тем, что в нем k -я и m -я партии меняются местами. Очевидно, $S_{k \leftrightarrow m}^* - S^* \leq 0$. Последнее неравенство согласно (2) переписывается в виде

$$0 \geq S_{k \leftrightarrow m}^* - S^* = a_q B_{k-1} + a_r B_{v-1} b_r^{m-v} - a_r B_{k-1} - a_k B_{v-1} b_q^{m-v} \Leftrightarrow a_q B_{k-1} (1 - B_{v-k} b_q^{m-v}) \leq a_r B_{k-1} (1 - B_{v-k} b_r^{m-v}), \quad (3)$$

где $B_{j-1} = \bar{b}_1 \cdot \dots \cdot \bar{b}_{j-1}$ (не зависит от номера партии).

Но $a_q > a_r$, так как $q \leq v-1 < r$. Кроме того, из условий теоремы 2 верна цепочка неравенств

$$q \leq v-1 < r \Rightarrow b_q < b_r \Leftrightarrow B_{v-k} b_q^m < B_{v-k} b_r^m, \Leftrightarrow 1 - B_{v-k} b_q^m > 1 - B_{v-k} b_r^m.$$

Из этого следует, что неравенство (3) не верно. Противоречие. То есть сначала на переработку идут партии первой категории и только потом, начиная с этапа v , – второй категории. Из теоремы 1 следует, что для достижения максимума оптимальная переработка партий 1-й категории должна идти по жадной стратегии, а после, начиная с v -го этапа, параметры партий второй категории удовлетворяют условиям, когда для оптимального результата партии должны перерабатываться по бережливой стратегии. Такая переработка партий обеих категорий соответствует *жадно-бережливой стратегии*.

Теорема 3 о бережливо-жадной стратегии

Пусть нумерация партий осуществлена так, что выполняются следующие неравенства:

- 1) $a_1 = a_2 = \dots = a_v = a_{v+1} = \dots = a_n$;
- 2) $b_{ij} = b_i$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, v-1}$;
- 3) $b_{ij} = \bar{b}_j$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{v, n}$;
- 4) $\frac{n-2}{n-1} \leq b_1 < b_2 < \dots < b_v < b_{v+1} < \dots < b_n$.

Тогда при данных параметрах партий бережливо-жадная стратегия является оптимальной.

Доказательство. Аналогично доказательству теоремы 2 назовем партии с нумерацией от 1 до $v-1$ партиями первой категории, а с нумерацией от v до n – партиями второй категории и сделаем вывод, что партий первой категории меньше, чем партий второй категории, или столько же.

Предположим, что в оптимальном плане хотя бы одна партия первой категории с номером q стоит на переработку под номером m , $m \geq v$, тогда какая-то партия второй категории с номером r имеет в оптимальном плане номер k , $k \leq v-1$.

Далее, рассуждая аналогично теореме 2, выполняем неравенство $S_{k \leftrightarrow m}^* - S^* \leq 0$, которое согласно (2) переписывается в виде (вид уже будет немного другой)

$$0 \geq S_{k \leftrightarrow m}^* - S^* = a_q b_q^{k-1} + a_r B b_r^{v-1} - a_r b_r^{k-1} - a_q B b_q^{v-1} \Leftrightarrow a_q b_q^{k-1} (1 - B b_q^{v-k}) \leq a_r b_r^{k-1} (1 - B b_r^{v-k}), \quad (4)$$

где $B = \bar{b}_v \cdot \dots \cdot \bar{b}_{m-1}$ (не зависит от номера партии).

Но $a_q = a_r$, кроме того, так как $q \leq v-1 < r$, верны неравенства

$$b_q < b_r \Leftrightarrow Bb_q^{v-k} < Bb_r^{v-k} \Leftrightarrow 1 - Bb_q^{v-k} > 1 - Bb_r^{v-k},$$

из этого следует, что неравенство (4) не верно.

Противоречие. Поэтому сначала на переработку идут партии первой категории и только потом, начиная с этапа v , – второй категории. Нетрудно видеть, что для максимизации первой части целевой функции сначала нужно следовать бережливой стратегии. Для переработки партий второй категории «начальная сахаристость» всех оставшихся партий на начало v этапа различна и равна $p_{iv} = a_i b_i^{v-1}$, а коэффициенты деградации зависят только от номера этапа переработки, а значит, для максимизации второй части выхода продукта нужно применить жадную стратегию. Такая переработка соответствует *бережливой жадной стратегии*.

Итак, для комбинации бережливого и жадного алгоритмов найдены условия на параметры партий сырья для обеих стратегий, чтобы соответствующая стратегия была оптимальной.

Обратим внимание, что отсутствие точного знания параметров партий (сортов) сахарной свеклы не мешает составить рекомендации для квази-оптимальной переработки для случаев распределения параметров партий близко к рассмотренным в статье. Поэтому данная информация может быть использована в качестве математической основы для разработки ИИС по переработке сахарной свеклы.

Работа выполнена по договору № ССЗ-1771 от 22.04.2021 г. на выполнение НИОКТР на тему: «Создание высокотехнологичного производства сахара на базе АО «Сергачский сахарный завод»», в рамках реализации Соглашения о предоставлении из федерального бюджета субсидии на развитие кооперации российской образовательной организации высшего образования и организации реального сектора экономики в целях реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства № 075-11-2021-038 от 24.06.2021 г. (ИГК 000000S407521QLA0002).

Литература

1. Тужилкин В.И., Штерман С.В., Бодин А.Б. О роли сахара в современном мире. Часть I // Пищевая промышленность. 2012. № 7. С. 54–57.
2. Капустенко П.А. и др. Энергосберегающее теплообменное оборудование в сахарной промышленности // Пищевая промышленность. 2004. № 10. С. 50–52.
3. Gorin S.V., Pavlov A.V. Economic and mathematical harmonization model of manufacturing and distribution operations of food industry enterprise // Journal of international scientific researches. 2013. № 4(17). P. 21–23.
4. Balandin, D.V. [and etc.]. Mathematical Modeling and Optimization of Scheduling for Processing Beet in Sugar Production / In book Balandin, D., Barkalov, K., Meyerov, I. (eds) Communications in Computer and Information Science. 2022. V. 1750. P. 227–238. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24145-1_19.
5. Balandin, D.V. [and etc.]. Educational and Research Project “Optimization of the Sugar Beet Processing Schedule” / In book Voevodin V., Sobolev S., Yakobovsky M., Shagaliev R. (eds). Supercomputing. Lecture Notes in Computer Science, book series (LNCS, volume 13708). 2022 P. 409–422. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22941-1_30.
6. Balandin D.V., Kuzenkov O.A., Egamov A.I. Estimating the efficiency of quasi-optimal strategies for sugar beet processing // Eurasian Union of Scientists. Series: Technical, Physical and Mathematical Sciences. 2022. № 9(102). P. 33–39. <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.102.1724>.
7. Кухар В.Н., Чернявский А.П., Чернявская Л.И., Моканюк Ю.А. Методы оценки технологических качеств сахарной свеклы с использованием показателей содержания калия, натрия и α -аминного азота, определенных в свекле и продуктах ее переработки // Сахар. 2019. № 1. С. 18–36.
8. Сельскохозяйственный словарь-справочник / гл. ред. А.И. Гайстер. Москва – Ленинград : Государственное издательство колхозной и совхозной литературы «Сельхозгиз», 1934. 1280 с.
9. Банди Б. Основы линейного программирования. М. : Радио и связь, 1989. 176 с.
10. Медведев С.Н. Нахождение области устойчивости интервальной задачи о назначениях // Вестник Воронеж. гос. тех. ун-та. Воронеж : Воронеж. гос. тех. ун-т., 2011. Том 7, № 10. С. 51–54.

Роль базовых моделей в преодолении противоречий при формализованном описании живых систем

В.Г. Яхно

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород,
yakhno@ipfran.ru

Введение

Главное противоречие при построении теоретических описаний поведения живой природы, как сейчас понятно, связано с огромным объемом экспериментальных данных и отсутствием общепризнанных представлений (языков), обеспечивающих адекватность формализованных описаний и сжатия исходных данных. Дело в том, что за схемами связей в изучаемых областях (хотя они и конечны, но потенциал противоречий в номенклатуре наименований в них имеется) стоит широкий спектр возможных динамических режимов. Рассмотрение таких процессов требует согласованной классификации и формирования языковых конструкций для адекватного отражения реально существующих нестабильностей и переходных процессов в живой природе. При этом обычная логика, опирающаяся только на набор правил, более приспособлена для описания квазистационарных состояний. А вот логика получаемых решений из базовых моделей уже продемонстрировала свою эффективность при описании динамических режимов изучаемых физических объектов. Поэтому расширение представлений о базовых моделях для живых систем весьма актуально в настоящее время. Существуют также противоречия между выбранными для изучения экспериментальными данными и реальными предпочтениями, опытом, целями и методологией самого исследователя, взявшегося за анализ выбранных им данных, тем более что об этом либо забывают упоминать, либо специально умалчивают. Неважно, как это делается: бессознательно или осознанно. Получившийся результат всегда несет следы такого выбора. В докладе рассматриваются такие упрощенные модели, которые помогли автору снять тяжесть непонимания (т. е. описать их на формализованном языке) с ряда привычных в обыденном языке названий, которые используются повсеместно при рассмотрении особенностей восприятия живых систем.

Варианты формирования упрощенных моделей

С физической точки зрения живую систему можно рассматривать как механизм, состоящий из связанных, квазинезависимых и перенастраиваемых модулей, который выполняет необходимые для рассматриваемой системы операции распознавания по преодолению «препятствий» для достижения поставленных целей. Такие системы имеют иерархическое строение из составляющих их под-

систем. Важно отметить, что определяющий признак живой системы – это возможность создания интерпретации входного сигнала в активированных внутри нее распознающих структурах и использовании этой интерпретации для оптимизации текущего состояния на основе прошлого опыта. Язык описания обычно строится из предположения, что как исходная система в целом, так и элементы ее иерархии выполняют обработку внешних и внутренних сенсорных сигналов, операции принятия решений в соответствии с поставленными целями.

На основе физической методологии исследователи предлагают различные версии «базовых моделей», решения которых адекватно описывают динамические режимы поведения экспериментальных прототипов. Так, с помощью схемы П.К. Анохина было введено понятие о важнейшем признаке живой системы – опережающем отражении входного сигнала. В работах А.М. Иваницкого [1, 2] это возвратные циклы входного сенсорного сигнала (или re-entry по Дж.М. Эдельману). В.Я. Сергин [3, 4] ввел циклы самоотождествления. Ряд исследователей [5–7] переводит различные исходно сложные схемы в упрощенные версии, например, анализ экспериментальных данных проводится через понятия об «уровнях значимости обобщенных средств управления» [5], а итоговый результат функционирования системы рассматривается с помощью «ресурсных диаграмм» [6–8]. На рис. 1 приведена типичная диаграмма взаимосвязей основных результирующих переменных, которые получаются в процессе множества алгоритмических действий в процедурах распознавания входного сигнала. По оси абсцисс вводится величина ERR – ошибка между ожидаемым по плану сигналом (опережающее отражение, имитация или другие подобные определения) и реально зарегистрированным на входе сигналом. По оси ординат – ресурсы, требуемые для выполнения тех алгоритмических операций, которые система приобрела, нарабатала в своем прошлом опыте.

Примеры ресурсов: время; обеспеченность энергией; количество и адекватность алгоритмов прошлого опыта; возможности технической реализации; эмоциональный опыт – возможности вычисления мер соответствия прошлому опыту; сетевые связи и оценка полезности включения системы во «властные группировки»; другие возможности.

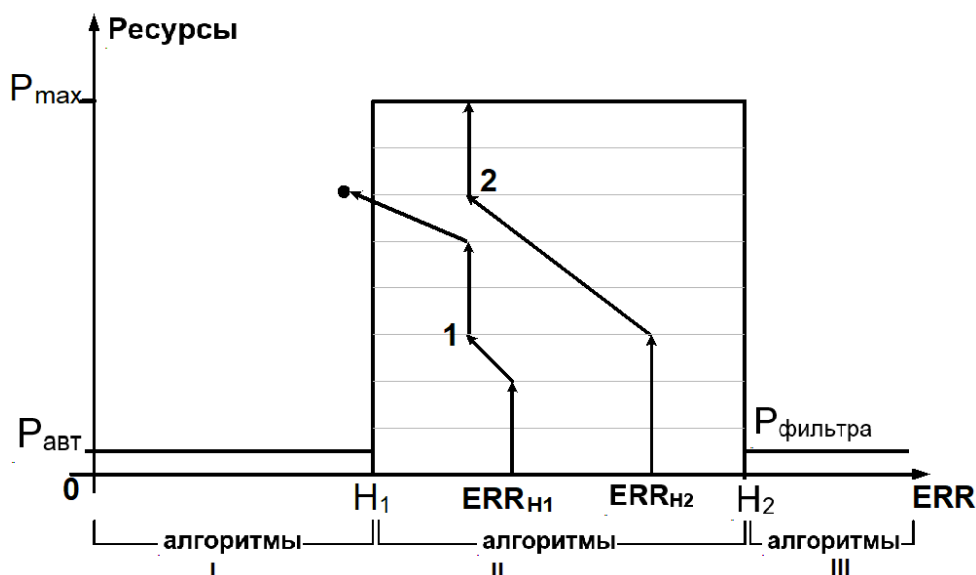


Рис. 1. Пример ресурсной диаграммы, на которой отражены экспериментально измеряемые величины затрачиваемых ресурсов при выполнении различных режимов восприятия сигнала. Переменная ERR представляет собой ошибку, вычисляемую с помощью алгоритмов для меры несоответствия между ожидаемым и реально зарегистрированным сигналом. Попадание ERR в диапазон от 0 до H_1 соответствует бессознательным (автоматическим) режимам принятия решений, которые обеспечиваются алгоритмами из зоны «I» и тратой ресурсов $\sim P_{\text{авт}}$. Попадание ERR в диапазон от H_1 до H_2 запускает режимы поиска новых алгоритмов из зоны «II», которые с использованием имитации входного сигнала могли бы обеспечить снижение начальной ошибки (например, ERR_{H_1} или ERR_{H_2}) до значений ниже порога H_1 . Попадание ERR в диапазон от H_2 и выше соответствует бессознательному режиму фильтрации (игнорированию входного сигнала), который обеспечивается соответствующими алгоритмами из зоны «III» и тратой ресурсов $\sim P_{\text{фильтра}}$

Таким образом, рассмотрение динамических режимов исходно сложной системы позволяет ввести формализованные определения режимов поведения живых систем с помощью естественных критериев [1–8]. Однако описание системы с помощью основных результирующих переменных на «ресурсной диаграмме» их качественное различие выглядит более наглядно:

а) бессознательное восприятие основано на прошлом опыте успешного выполнения необходимых системе функциональных операций и запускается малой величиной ошибки (алгоритмы из зоны «I» и зоны «III» на рис. 1);

б) элементарный процесс «сознания» (или «осознания») связан с использованием *внутренней имитации образа* входного сенсорного сигнала, ориентированного на повышение точности работы распознающего модуля за счет процессов оптимизации, реализуемых в течение циклов настройки [6–8] (поиск новых алгоритмов из зоны «II»). Например, похожий смысл содержится и в определении С.А. Полевой и С.Б. Парина: «Сознание – это механизм согласования индивидуального и коллективного опыта на основе интеграции информационных образов» [9]. Не следует забывать также оригинальную концепцию В.М. Аллахвердова «о взгляде на сознание как механизм проверки догадок об окружающем» [10];

в) интуитивное восприятие обеспечивается обучающими сигналами от «внешней» для обучающейся системы среды, в том числе и через стрессовые состояния [8];

г) разумность функционирования любой распознающей системы определяется, в первую очередь, областью ее операционной деятельности. Разум распознающей системы можно оценивать по экспериментальным кривым ошибок первого и второго рода, зависящих от порога принятия решений [8].

Естественно, что динамические режимы перехода между различными возможными состояниями или реакциями исследуемой системы (определяемые, в частности, величинами H_1 и H_2 на рис. 1) зависят от энергетической подпитки, информационных и управляющих сигналов из внешней среды. Версии их возможных изменений и соответствие экспериментальным данным планируется обсудить со слушателями доклада.

Взаимодействие и коммуникации когнитивных моделей

На языке базовых моделей и соответствующих им ресурсных диаграмм можно описывать и широкий спектр режимов взаимопонимания или непонимания когнитивных агентов в социуме [11–19]. Разнообразие этих режимов настолько велико, что у недостаточно подготовленных, а часто и незаинтересованных исследователей просто пропадает желание участвовать в таком анализе и обсуждениях. Тем не менее у автора (пока?) еще сохраняется оптимизм в перспективности исследований «характеристик» базовых моделей.

Позитивные примеры будут рассмотрены в докладе.

Выводы

На основе используемой автором классификации базовых моделей приведены примеры языка описания динамических режимов поведения живых систем. Адекватность такого языка можно оценивать по степени «сжатия» данных о многих изучаемых жизненных ситуациях. Снимается также «туман загадочности» с широкого круга экспериментальных данных о природе живых систем и результатах их восприятия другими исследователями. При этом, несомненно, остается возможность уточнения полученного описания, как через коррекцию методики эксперимента, так и через коррекцию выбираемых базовых моделей и их решений. Таким образом, разработка и анализ базовых моделей для изучения механизмов функционирования живых систем и структур их коллективной активности в популяциях, по мнению автора, имеет широкие перспективы для развития.

Работа профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН, проект № FFUF-2021-0014.

Литература

1. *Иваницкий А.М.* Мозговые механизмы оценки сигналов. М. : 1976.
2. *Иваницкий А.М.* Главная загадка природы: как на основе работы мозга возникают субъективные переживания // Психологический журнал. 1999. Т. 20, № 3. С. 93–104.
3. *Сергин В.Я.* Психофизиологические механизмы осознания: гипотеза самоотождествления // Журн. высш. нерв. деят. 1998. 48 (3): 558–571.
4. *Сергин В.Я.* Автоотождествление и сенсорно-моторное повторение как физиологические механизмы сознания // Журн. высш. нерв. деят. 2020. 66 (2): 1–20.
5. ВП СССР, Основы социологии, Санкт-Петербург, 2010: <http://kob.su/kobbooks/osnovy-sotsiologii>.
6. *Яхно В.Г., Нуйдель И.В., Тельных А.А., Бондаренко Б.Н., Сборщиков А.В., Хилько А.И.* Способ адаптивного распознавания информационных образов и система для его осуществления. Российский патент на изобретение № 2160467 от 10.12.2000; United States Patent No US 6,751, 353 B1 Jun/ 15, 2004.
7. *Яхно В.Г., Макаренко Н.Г.*: Поможет ли нам создание «Цифрового двойника человека» лучше понимать друг друга? // Подходы к моделированию мышления. Глава 6 / под ред. В.Г. Редько. М. : ЛЕНАНД, 2014. С. 169–202.
8. *Yakhno V., Parin S., Polevaya S., Nuidel I. and She-magina O.* Who Says Formalized Models are Appropriate for Describing Living Systems? // Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV: 2021. P. 10–33. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-60577-3>.
9. *Парин С.Б.* Цикл «О чем думают животные». Лекция 1 «Декларация о сознании» // 4 апреля 2023 г. https://vk.com/video-73339622_456239219.
10. *Аллахвердов В.М.* Сознание как парадокс // Экспериментальная психология, т. 1. СПб. : Изд-во ДНК, 2000. 528 с.
11. *Хазин М.* Маневр Сталина, который нам только предстоит // 3 июля 2023 г. <https://www.youtube.com/watch?v=HmxdJnq22X8>.
12. *Дубровский Д.И.* Проблема сознания и мозг // 19 сентября 2017 г. Семинар Центра нейронаук и когнитивных наук МГУ. <http://mainseminar.ru>.
13. *Александров Ю.И.* Мозг – психика – культура с позиций системно-эволюционного подхода // 10 октября 2017 г. Семинар Центра нейронаук и когнитивных наук МГУ. <http://mainseminar.ru>, <https://www.youtube.com/watch?v=UZz2m1fUk4>.
14. *Черниговская Т.В.* Откуда берется мысль: разрешима ли психофизиологическая проблема? // 31 октября 2017 г. Семинар Центра нейронаук и когнитивных наук МГУ, <http://mainseminar.ru>, <https://www.youtube.com/watch?v=MXXIvvVH6PA>.
15. *Анохин К.В.* «Когнитом – невероятная простота мозга». Лекция // 7 июня 2023 г. https://www.youtube.com/watch?v=w_HmVA5rxt8.
16. *Анохин К.В.* Память, сознание, интеллект с Константином Анохиным. Институт перспективных исследований мозга МГУ. 21 июня 2023 г. <https://www.youtube.com/watch?v=DsuXu6-I3RU>.
17. *Васильев В.В.* Есть ли шансы решить проблему «сознание–тело»? // Философия сознания: научный семинар РУДН. 14 апреля 2021 г. Запись пятого заседания научного семинара «Философия сознания» в 2020/2021 учебном году. <https://www.youtube.com/watch?v=qvq4BWzmlUA>.
18. *Васильев В.В.* Философия сознания. Новейшие тенденции – 2. Экспериментальные науки о сознании // 21 октября 2021 г. <https://www.youtube.com/watch?v=K7qBvVvQGH1>.
19. *Спиридонов В.* Великая иллюзия нашего сознания : интервью Владимира Спиридонова 19.06.2023. Когнитивная нейронаука утверждает, что человек помнит гораздо меньше, чем ему кажется. <https://www.youtube.com/watch?v=IWho6h4T0Ro>.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А		Л		Т	
Абрашкин А.А.	16	Лебедев А.А.	74	Такаишвили Л.В.	158
Агальцов М.В.	55, 144	Лобов С.А.	75	Тексева А.А.	94
Агеев А.И.	12	Локоткова В.А.	90	Тищенко А.Г.	32
Александров И.О.	19	Луковникова Н.М.	12		
Александров Ю.И.	35			У	
Александрова Н.Ш.	10	М		Ушаков В.Л.	160
Алексеев А.К.	23	Максимова Н.Е.	19		
Антонец В.А.	7	Мальшев Ю.А.	79	Ф	
Апанович В.В.	35	Мамаев А.Н.	42	Федотчев А.И.	26
Арамян Э.А.	35	Медведев А.В.	82	Фомин И.С.	162
Архипов А.Е.	162	Митрошина Е.В.	118		
		Михайлова Е.В.	84	Х	
Б		Молоснова В.Д.	176	Хилько А.И.	166
Барон В.Д.	107	Морозова С.В.	87	Хоботов А.Г.	166
Бахшиев А.В.	66	Мухина Е.А.	90, 94	Хусаинов Р.Р.	135
Беркман Д.А.	151				
Бондарь А.Т.	26, 29	Н		Ц	
Бородин Н.С.	45	Насруллаев Р.К.	53	Циркова М.М.	94
Бураго П.Н.	181	Никонов Ю.В.	97	Цукерман В.Д.	172
		Никулина М.В.	100		
В		Нуйдель И.В.	103	Ч	
Варфоломеева А.В.	32			Чеберева О.Н.	176
Ведунова М.В.	118	О		Чернавская О.Д.	179
Вечкапова С.О.	129	Ольшанский В.М.	107	Черниговская Т.В.	180
Виноградова Л.В.	148				
		П		Ш	
Г		Палагин С.В.	111	Шемагина О.В.	166
Гладилин Д.Л.	35	Панина О.С.	139	Шилов С.Ю.	12
Головина А.А.	39	Парин С.Б.	26, 114	Шубина Л.В.	29
Горбунов И.А.	42, 87	Пахомов А.М.	118		
Громов В.А.	12, 45, 49	Перевознюк Д.А.	122	Э	
		Переслегин С.Б.	12	Эгамов А.И.	181
Д		Переслегина Е.Б.	12		
Данг К.Н.	49	Перов Д.А.	125	Ю	
		Полевая С.А.	26, 84, 94, 103	Юдаков К.С.	35
Е		Пономаренко В.И.	158		
Емельянова Е.П.	144	Проскура А.Л.	129, 135	Я	
		Пупикина М.Е.	132	Ярков Р.С.	118
Ж				Яхно В.Г.	39, 79, 103, 185
Журавлев М.О.	53, 55	Р			
		Ратушняк А.С.	129, 135		
З		Руннова А.Е.	53, 139		
Зимин И.А.	58				
Зленко Д.В.	107	С			
		Савюк М.О.	118		
И		Сварник О.Е.	142		
Исаков Т.Т.	66	Сельский А.О.	144		
		Семенова Н.И.	122		
К		Сергеев К.С.	122		
Каганов Ю.Т.	59	Симонян М.А.	139		
Калинина В.И.	166	Ситникова Е.Ю.	122, 132, 146		
Капустников А.А.	155	Слепнев А.В.	122		
Киселев А.Р.	55	Созонов Е.А.	148		
Клиньшов В.В.	62	Станкевич Л.А.	151		
Ковальчук А.В.	62	Стасенко С.В.	58, 74		
Коган А.С.	49	Степасюк В.	75		
Колосов А.В.	103	Суетенков Д.Е.	53		
Корсаков А.М.	66, 151, 162	Сулейманова Е.М.	148		
Кривонос М.И.	118	Сысоев И.В.	148, 155, 158		
Кузенков О.А.	70, 82, 125	Сысоева М.В.	155		

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Предисловие</i>	4
<i>Антонец В.А.</i> Пространственно-временные характеристики диффузии молекул предопределили топологическую организацию многоклеточных животных и возникновение у них познавательной способности.....	7
<i>Александрова Н.Ш.</i> О роли биологического и социального в становлении вербальной коммуникации.....	10
<i>Агеев А.И., Громов В.А., Луковникова Н.М., Переслегин С.Б., Переслегина Е.Б., Шилов С.Ю.</i> Кризис сложности. Русский доклад Римскому клубу.....	12
<i>Абрашкин А.А.</i> Новая хронология в Книге Бытия.....	16
<i>Александров И.О., Максимова Н.Е.</i> Основной фактор неоднородности семантической сети.....	19
<i>Алексеев А.К.</i> Об оценке количества ценной информации, содержащейся в данных наблюдений.....	23
<i>Бондарь А.Т., Федотчев А.И., Полевая С.А., Парин С.Б.</i> Пространственные особенности нелинейных процессов в коре головного мозга человека при поличастотной стимуляции.....	26
<i>Бондарь А.Т., Шубина Л.В.</i> Соотношение ритмов локальных полевых потенциалов во время развития эпилептического статуса у морской свинки.....	29
<i>Варфоломеева А.В., Тищенко А.Г.</i> Возможности оценки нелинейной динамики вариабельности сердечного ритма при индивидуальном и совместном решении задач.....	32
<i>Гладилин Д.Л., Апанович В.В., Арамян Э.А., Юдаков К.С., Александров Ю.И.</i> Анализ нестационарных временных рядов в ЭЭГ-исследовании приобретения и совершенствования навыка.....	35
<i>Головина А.А., Яхно В.Г.</i> Упрощенные модели для описания многозадачных режимов в живых распознающих системах.....	39
<i>Горбунов И.А., Мамаев А.Н.</i> Моделирование некоторых зрительных иллюзий на базе нейросетевых алгоритмов.....	42
<i>Громов В.А., Бородин Н.С.</i> Внутренняя размерность естественного языка.....	45
<i>Громов В.А., Данг К.Н., Коган А.С.</i> Семантические траектории текстов естественного языка (поймай бота).....	49
<i>Журавлев М.О., Руннова А.Е., Суетенков Д.Е., Насруллаев Р.К.</i> Особенности электрической активности головного мозга при ортодонтической коррекции.....	53
<i>Журавлев М.О., Агальцов М.В., Киселев А.Р.</i> Новый метод детектирования сердечного ритма для автоматической обработки записей ночного мониторинга сна.....	55
<i>Зимин И.А., Стасенко С.В.</i> Сверточная нейронная сеть с моделью динамического синапса.....	58
<i>Каганов Ю.Т.</i> Бионический подход к моделированию динамики интеллектуальных систем (на примере анализа гиперспектральных изображений).....	59
<i>Клиньшов В.В., Ковальчук А.В.</i> О длительности динамической памяти в спайковых нейронных сетях.....	62
<i>Корсаков А.М., Исаков Т.Т., Бахшиев А.В.</i> Реализация инкрементного обучения на сегментной спайковой модели нейрона.....	66
<i>Кузенков О.А.</i> Формализация определения информации в области компьютерных наук.....	70
<i>Лебедев А.А., Стасенко С.В.</i> Нейроморфная архитектура обработки данных, основанная на гибридной схеме использования спайковой нейронной сети и алгоритма машинного обучения ..	74
<i>Лобов С.А., Степасюк В.</i> STDP-подобная модель синаптической пластичности для реализации временного и частотного кодирования.....	75

<i>Малышев Ю.А., Яхно В.Г.</i> Разработка варианта биоморфной системы визуальной навигации	79
<i>Медведев А.В., Кузенков О.А.</i> Моделирование конкуренции языков в двуязычном сообществе	82
<i>Михайлова Е.В., Полевая С.А.</i> Особенности когнитивных функций при употреблении психоактивных веществ	84
<i>Морозова С.В., Горбунов И.А.</i> Моделирование и прогнозирование динамики применения различных математических методов в психологии с 1910 по 2019 годы	87
<i>Мухина Е.А., Локоткова В.А.</i> Нарушения когнитивных функций у лиц, зависимых от психоактивных веществ	90
<i>Мухина Е.А., Текеева А.А., Циркова М.М., Полевая С.А.</i> Особенности когнитивных функций пациентов с ОНМК	94
<i>Никонов Ю.В.</i> О моделировании когнитива на примере этанол-зависимой функциональной системы	97
<i>Никулина М.В.</i> Деперсонализация анализа variability ритма сердца при оценке аллостатической нагрузки	100
<i>Нуйдель И.В., Колосов А.В., Полевая С.А., Яхно В.Г.</i> Феноменологическая модель нейропластичности	103
<i>Ольшанский В.М., Барон В.Д., Зленко Д.В.</i> Отечественная школа электроэкологии: приоритеты, методы и перспективы	107
<i>Палагин С.В.</i> Нелинейность и рефлексивность транскультурной экспансии в становлении ноосферы	111
<i>Парин С.Б.</i> Сознание как оно есть?	114
<i>Пахомов А.М., Кривоносов М.И., Савюк М.О., Ярков Р.С., Ведунова М.В., Митрошина Е.В.</i> Анализ активности нейрон-астроцитарных сетей с применением динамического графа распространения кальциевого сигнала	118
<i>Перевознюк Д.А., Сергеев К.С., Слепнев А.В., Семенова Н.И., Ситникова Е.</i> Простая искусственная нейронная сеть распознаёт состояние «медленный сон» у крыс в свободном поведении	122
<i>Перов Д.А., Кузенков О.А.</i> Построение оптимальной обратной связи для моделирования вертикальных миграций зоопланктона с учетом сезонных изменений	125
<i>Проскура А.Л., Вечкапова С.О., Ратушняк А.С.</i> Вклад инсулина в синаптическую пластичность гиппокампа	129
<i>Пукикина М.Е., Ситникова Е.Ю.</i> Стратегии поведения самцов и самок крыс в классической парадигме активного избегания: когнитивные способности в задаче с негативным подкреплением	132
<i>Ратушняк А.С., Проскура А.Л., Хусаинов Р.Р.</i> Моделирование биологических функциональных когнитивных систем через эволюцию негэнтропийных агентов	135
<i>Руннова А.Е., Панина О.С., Симонян М.А.</i> Межполушарные различия в ЭЭГ у доношенных и поздних недоношенных новорожденных в первые дни постнатальной жизни	139
<i>Сварник О.Е.</i> Этапы и нейронные закономерности приобретения инструментальных навыков у человека и других животных	142
<i>Сельский А.О., Агальцов М.В., Емельянова Е.П.</i> Применение рекуррентного анализа для распознавания стадий быстрого и медленного сна	144
<i>Ситникова Е.</i> Ультразвуковая вокализация лабораторных крыс как новый источник информации для экспериментатора	146
<i>Созонов Е.А., Сысоев И.В., Сулейманова Е.М., Виноградова Л.В.</i> Использование эмпирических моделей с радиальными базисными функциями для выявления связей между полушариями мозга при распространяющейся депрессии	148
<i>Станкевич Л.А., Корсаков А.М., Беркман Д.А.</i> Когнитивные модели восприятия и их реализация на нейроморфных сетях	151
<i>Сысоев И.В., Капустников А.А., Сысоева М.В.</i> Универсальные механизмы переходной динамики в сетевых моделях таламокортикальной системы мозга	155
<i>Такашвили Л.В., Пономаренко В.И., Сысоев И.В.</i> Реализация радиофизической модели нейрона ФитцХью – Нагумо с аппроксимацией нелинейной функции диодами	158

<i>Ушаков В.Л.</i> Когнитивные процессы и нейросетевые архитектуры головного мозга	160
<i>Фомин И.С., Корсаков А.М., Архипов А.Е.</i> Распознавание людей с помощью сегментного спайкового нейрона по признакам, извлеченным сямской сверточной нейронной сетью	162
<i>Хоботов А.Г., Калинина В.И., Хилько А.И., Шемагина О.В.</i> Анализ эффективности использования линейных и нейроноподобных процедур в обработке гидроакустических сигналов на фоне реальных морских шумов.....	166
<i>Цукерман В.Д.</i> Схемная организация, нейронные коды и ментальные представления нейрокогнитивного интеллекта модели сетей с четным циклическим торможением.....	172
<i>Чеберева О.Н., Молоснова В.Д.</i> Актуальные задачи изучения психофизиологии восприятия архитектурно-пространственной среды городского пространства	176
<i>Чернавская О.Д.</i> К вопросу о возможности цифрового воссоздания личности (Digital Immortality).....	179
<i>Черниговская Т.В.</i> Сознание и возможности его экспериментального изучения	180
<i>Эгамов А.И., Бураго П.Н.</i> Математические аспекты интеллектуально-информационной системы переработки сырья в сахарном производстве.....	181
<i>Яхно В.Г.</i> Роль базовых моделей в преодолении противоречий при формализованном описании живых систем	185
<i>Авторский указатель</i>	188

Научное издание

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2023**

ТРУДЫ VIII ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Редакторы *Н.Н. Кралина, М.Ю. Кузнецова*
Технический редактор *Д.П. Семенова*
Компьютерная верстка *М.В. Башевой, Е.И. Казаровой, Н.Н. Кралиной*
Обложка *С.В. Кротовой*

Подписано в печать 31.07.2023. Формат 60×84½.
Усл. печ. л. 24,0. Уч.-изд. л. 22,6.
Тираж 100 экз. Заказ № 27(2023).

Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Отпечатано на ризографе в типографии ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46