



Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2025

ТРУДЫ IX ВСЕРОССИЙСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ



Нижний Новгород
2025

Междисциплинарная ассоциация когнитивных исследований
Российская инженерная академия
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 – 2025

**ТРУДЫ
IX ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2025

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

Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2025: труды IX 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, 2025. – 168 с.

ISBN 978-5-8048-0128-2

Сборник научных трудов содержит доклады IX Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2025» (Нижний Новгород, 25–29 августа 2025 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.

УДК159.9.07(063)
ББК88.25я431

Программный комитет конференции

Председатель:

Парин Сергей Борисович – президент МАКИ

Сопредседатели:

Александров Юрий Иосифович (ИП РАН, Москва)

Анохин Константин Владимирович (ИПИМ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)

Киреев Максим Владимирович (ИМЧ РАН, Санкт-Петербург)

Ушаков Вадим Леонидович (НИЦ «Курчатовский институт», Москва)

Черниговская Татьяна Владимировна (ИКИ СПбГУ, Санкт-Петербург)

Шумский Сергей Александрович (ФИ РАН, Москва)

Члены программного комитета:

Антонец Владимир Александрович (ННГУ; ИПФ РАН, Нижний Новгород)

Григорьева Вера Наумовна (ПИМУ, Нижний Новгород)

Горбань Александр Николаевич (Научно-исследовательский институт AIRI, Москва)

Дорожкин Александр Михайлович (ННГУ, Нижний Новгород)

Дунин-Барковский Виталий Львович (НИИСИ РАН, Москва)

Жданов Александр Аркадьевич (ИТМиВТ РАН, Москва)

Еськов Валерий Матвеевич (СурГУ, Сургут)

Иванченко Михаил Васильевич (ННГУ, Нижний Новгород)

Казанцев Виктор Борисович (ННГУ, Нижний Новгород)

Кочаровская Екатерина Рудольфовна (ИПФ РАН, Нижний Новгород)

Крылов Андрей Константинович (ИП РАН, Москва)

Парин Сергей Борисович (ННГУ, Нижний Новгород)

Полевая Софья Александровна (ННГУ, Нижний Новгород)

Ратушняк Александр Савельевич (КТИ ВТ СО РАН, Новосибирск)

Редько Владимир Георгиевич (НИИСИ РАН, Москва)

Сергеев Александр Михайлович (НЦФМ, Саров)

Станкевич Лев Александрович (СПИИ РАН, Санкт-Петербург)

Стасенко Сергей Викторович (ННГУ, Нижний Новгород)

Толоконников Георгий Константинович (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Москва)

Федотчев Александр Иванович (ИБК РАН, Пущино)

Чернавская Ольга Дмитриевна (ФИ РАН, Москва)

Яхно Владимир Григорьевич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)

Оргкомитет конференции:

Яхно Владимир Григорьевич (ИПФ РАН, Нижний Новгород) – *председатель*
Нуйдель Ирина Владимировна (ИПФ РАН, Нижний Новгород) – *ученый секретарь*
Головина Алина Андреевна (ННГУ, Нижний Новгород) – *помощник ученого секретаря*
Антонец Владимир Александрович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Ковальчук Андрей Викторович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Мальшев Юрий Александрович (ИПФ РАН, Нижний Новгород)
Полевая Софья Александровна (ННГУ, Нижний Новгород)
Стасенко Сергей Викторович (ННГУ, Нижний Новгород)

Электронный адрес оргкомитета: nuidel@ipfran.ru ; alinagolovina_88@mail.ru

Web-site конференции: <https://nd-cogsci.ipfran.ru/2025/index.html>

*Дорогие участники
9-й конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях»!*

Через год, в конце июня, в Нижнем Новгороде состоится 11-я Международная конференция по когнитивной науке. То, что нашему старинному городу поручено проведение столь престижного международного конгресса, мы расцениваем как признание существенных научных и организационных достижений нижегородской школы когнитивных исследований.

В Нижегородском государственном университете (ННГУ) открыты и успешно работают аспирантура по когнитивной науке (специальность 5.12) и один из первых в России диссертационных советов по этой новой группе специальностей. Экспертные оценки нижегородских ученых по различным разделам исследований механизмов и процессов познания в живых системах пользуются вниманием и уважением научного сообщества. В немалой степени этому поспособствовала наша традиционная конференция, сателлитная «Международной конференции по когнитивной науке», и традиционное для нижегородских физических и математических школ внимание к физике сложных систем и открытость к мультидисциплинарным исследованиям в биологии, физиологии и медицине.

Традиции были заложены и упорно поддерживались выдающимися физиками и организаторами науки М.Т. Греховой, А.А. Андроновым, В.Л. Гинзбургом на радиофизическом факультете университета, а затем в Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) и Институте прикладной физики (ИПФ РАН) А.М. Сергеевым.

Исторически нижегородская нейронаука берет начало еще в XIX веке – от нашего великого земляка Ивана Михайловича Сеченова. В XX веке развитие нейрофизиологии получило мощный импульс с приездом в наш город выдающегося физиолога, одного из истинных основателей современной когнитивной науки П.К. Анохина. Этот факт недостаточно широко известен, а ведь именно в Горьком (так тогда назывался Нижний Новгород) родилась схема его знаменитой функциональной системы. Результаты работы Петра Кузьмича в Горьком стали проявляться уже после Великой Отечественной войны, когда его соратник и последователь М.А. Усиевич, а позднее воспитанник Всесоюзного института экспериментальной медицины Н.Ю. Беленков сумели в Горьковском медицинском институте вырастить целую плеяду известных нейрофизиологов: А.Т. Абакарова, В.А. Сосенкова, В.И. Щербакова, А.Б. Страхова. Параллельно в Горьковском университете развивалось научное направление, казалось бы, мало связанное с нейрофизиологией – изучение механизмов физиологического действия ядов животных. Нельзя, однако, забывать, что большинство этих токсинов обладает ярко выраженной нейротропной активностью. В русле этой экзотической тематики тоже выросли сильные нейрофизиологи: в первую очередь, Н.М. Артемов, Д.Б. Гелашвили и Б.Н. Орлов. Выдающуюся роль в мировой нейрофизиологии сыграл Александр Васильевич Зевеке. Исследования нейрофизиологических механизмов кожной чувствительности, в которых он использовал ранние научные разработки В.А. Зверева, на полвека опередили мировой уровень. А.В. Зевеке часто называют в числе основателей нейрокибернетики – по сути, одного из разделов современной когнитивной науки. Наконец, нужно назвать еще одно направление, близкое нейрофизиологии. Это биофизика. Признанная в мире школа В.А. Опритова и сегодня активно продолжает его исследования «нервной системы» растений.

Что касается формализованных описаний динамических режимов в живых системах, то в этих работах в НИРФИ, ИПФ РАН и ННГУ изучались возможности применения уже развитых радиофизических методов исследования сложных физических систем для экспериментального исследования и теоретического описания более широкого класса природных неравновесных систем. Физическая методология этих исследований опирается на экспериментальные данные и разработку различных версий «имитационных» и «базовых» моделей, адекватно описывающих динамические режимы поведения природных прото-типов.

Обычно «имитационные» модели ориентированы на возможность реализации таких операций или действий, которые до этого регистрировались только у естественных живых систем. Фактически разработки, в которых математические, программные и технические модели позволяют очень эффективно симулировать выполнение операций и действий живых прототипов, ориентированы на замену природных живых систем на модельные (технические) разработки-аналоги. Именно такие разработки получили сейчас наибольшую популярность. Обычно успехи таких разработок демонстрируются либо для четко определенных областей операционной деятельности, либо для ситуаций со стабильно определенными правилами функционирования.

Однако известно множество примеров, когда даже небольшие изменения в заранее установленных разработчиками условиях использования «воспитанных» ими искусственных систем часто приводят к непредсказуемым серьезным ошибкам. Таким образом, попытки полностью заменить людей, а порой и живые системы с «человеческим строем психики» на искусственные автоматы вызывают недоверие к результатам, получаемым с помощью сегодняшних систем искусственного интеллекта (ИИ). Поэтому серьезные разработчики сопровождают успехи ИИ призывами к разработкам дополнительного инструментария, с помощью которого можно будет выявлять, объяснять причины и осознанно и успешно корректировать его ошибки.

Одним из направлений на таком пути является построение базовых моделей, основанное на выявлении наиболее важных, смысловых переменных и параметров изучаемых иерархических систем, с последующим построением «балансных» уравнений для выделенных объектов изучения. Такие модельные уравнения ориентированы на поиск возможных динамических режимов, качественно соответствующих основным поведенческим закономерностям изучаемой природной системы. Смысловая модель помогает исследователям понимать динамические режимы в поведении природного прототипа, опираясь на «образные» представления. Фактически, с помощью таких смысловых моделей разрабатывается формализованный язык, объясняющий основные закономерности изучаемых процессов на понятной логике сопоставления решений математической модели с данными экспериментов. Кроме того, сами базовые математические модели и их решения можно интерпретировать как кодовую форму описания ключевых процессов в сложных имитационных моделях, и соответственно в изучаемых ими природных прототипах с помощью выбранных исследователем «огрубленных» смысловых переменных.

Подобным формализованным языком является теория колебаний, разработанная А.А. Андроновым и его соратниками и учениками. Этот язык продолжал разрабатываться и успешно применяться в НИРФИ и ИПФ РАН для изучения структур коллективной активности в неравновесных средах (группы Л.А. Островского и М.И. Рабиновича). Сейчас изучение особенностей пространственно-временных структур в таких средах, в том числе и биологических, продолжается их учениками. При этом формируемые базовые модели для живых систем спонтанно или осознанно опираются на идеи П.К. Анохина, которые были сформулированы именно в нашем городе 90 лет назад.

Многие также помнят, как М.А. Миллер активно обсуждал в своих выступлениях и статьях влияние лево- и правополушарных особенностей исследователей на то, как они воспринимают и формулируют интерпретационные описания предметов их научного интереса. Например, в статье «Фарадей – Максвелл – Герц – Хевисайд... О согласованности функциональных специализаций мозга» Михаил Адольфович рассматривал варианты развития представлений у разных первооткрывателей электромагнитных природных закономерностей.

В ННГУ особое внимание разработке базовых моделей природных процессов уделял Ю.И. Неймарк. Многие его ученики и соратники активно развивают методы математического моделирования живых систем и в настоящее время. Кроме того, целый ряд нейрофизиологических исследований проводится на кафедре нейротехнологий ННГУ, возглавляемой профессором, д.ф.-м.н. В.Б. Казанцевым. Одним из ведущих направлений кафедры является когнитивное моделирование. На этой относительно молодой кафедре успешно работает целая группа столь же молодых перспективных сотрудников, в частности, доктора физико-математических наук С.А. Лобов, С.Ю. Гордлеева, С.В. Стасенко, доктор биологических наук Е.В. Митрошина.

«Мы стоим на плечах предшественников» – хорошо известное высказывание. Для нижегородской нейронауки, а также для развития основ физики нейроподобных и когнитивных систем это более чем справедливо. Нам есть на что опереться.

В целом, сегодня когнитивная наука приобретает все большее значение. Мы присутствуем при подлинной революции в понимании сущности сознания. И хочется надеяться, что не только присутствуем.

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

Пучеж-Катунский астероид как причина глобального земного катаклизма

А.А. Абрашкин¹, Д.В. Квашнин, Н.Ф. Поляков²

¹НИУ «Высшая Школа Экономики», Нижний Новгород;
aabrashkin@hse.ru

²Администрация города Городец

Современное естествознание можно охарактеризовать как систему узкоспециальных независимых наук, развивающихся в строго очерченных рамках и на основе свойственных, как правило, только им методов и подходов. Между тем, проблемы геологической эволюции Земли и связанные с этими геофизическими процессами биосферные изменения требуют комплексного рассмотрения, а погружение в такие проблемы требует от ученого новых исследовательских установок, знаменующих рождение универсального когнитивного опыта и позволяющих соединять достижения разных наук. В докладе предпринята попытка именно с таких позиций взглянуть на падение одного из крупнейших астероидов в истории нашей планеты.

Пучеж-Катунский кратер – уникальная кольцевая структура на территориях Нижегородской и Ивановской областей. В списке крупнейших кратеров в мире ему отводят восьмое место. Во всех таблицах, статьях и справочниках указывается, что диаметр кратера составляет 80 км. Ученые, как правило, не задумываясь приводят это число, но оно требует пояснения. В рассматриваемом кратере кристаллический слой земной коры покрыт слоем осадочных пород. Таким образом, 80 км – это масштаб деформации внешнего (осадочного) слоя. Но насколько «травмировался» нижний слой? В данном случае под словом

«травмировался» мы имеем в виду не макроскопические возвышения его верхней границы (очевидно, что они тоже порядка 80 км), а степень разрушения, то есть наличие трещин или даже разломов. Обычно самый нижний слой считают однородным, но намного вероятнее, что он пронизан многочисленными трещинами, появившимися при ударе астероида. Каковы границы такого рода разрушений?

У геологов накоплен опыт распознавания границ астроблем («земных ран» от удара космического тела) по топографическим картам. Один из феноменологических «законов» их поиска такой [1]: обычно именно долины рек хорошо трассируют кольцевые структуры. Укажем в качестве примера на два кратера, которые можно назвать близнецами Пучеж-Катунского феномена.

Попигай (Попигойская астроблема) – метеоритный кратер в Сибири, в бассейне реки Попигой. Диаметр кратера – 100 км, глубина – 200 м. Это четвертый по размеру среди ударных кратеров Земли. Образован в результате удара астероида 35,7 млн. лет назад. Расположен частично в Красноярском крае, частично в Якутии. Физическая карта этого района приведена на рис. 1 (слева). Координаты попигойского кратера – 71°27'45" с. ш., 111°17'36" в. д. Эта точка находится в правом верхнем квадранте карты. Слева от нее отчетливо просматривается русло реки Рассохи, а справа – дуга озер, примыкающая к реке Попигой.

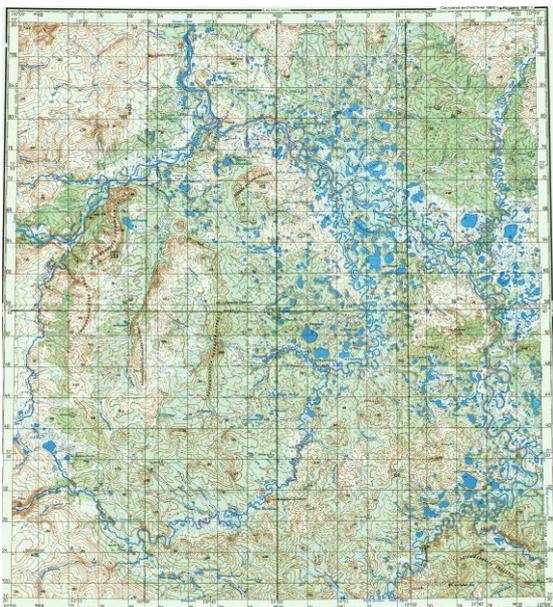


Рис. 1. Слева – физическая карта той части территории Сибири, где находится кратер Попигай; справа – фото кратера Маникуаган из космоса

Кратер Маникуаган – ударный кратер в центральной части провинции Квебек (Канада), который сформировался в результате столкновения 214 млн. лет назад с астероидом диаметром 5 км. Диаметр – около 100 км, но в процессе эрозии и отложения осадочных пород видимый размер уменьшился до 71 км. Это пятый по величине известный кратер на Земле. Водохранилище с одноименным названием представляет собой круговое озеро.

Для обоих кратеров-близнецов характерно наличие водных образований по периметру их границ. Несомненно, закон поиска кольцевых структур в обоих случаях работает. Но не следует ли тогда принимать за границу кратеров окружности, образуемые водными источниками на поверхности Земли?

Вернемся теперь к Пучеж-Катунскому кратеру. На аэрофотографии (рис. 2) видно дугообразное русло Луха (в верхнем и среднем течении), которое при своем продолжении «втыкается» в Стрелку (место слияния Оки и Волги). На карте (справа) четко просматривается водная «дуга», образованная рекой Белбаж и частью русла Керженца. Отметим также, что на северной границе кратера река Унжа вливается в Волгу и отворачивает ее от возможного движения по кольцу астроблемы. Таким образом, мы выделили общую окружность астроблемы, вдоль которой текут реки. Ее диаметр порядка 150 км. Например, расстояние между населенными пунктами Огибное на Керженце и Мугреево-Никольское на реке Лух составляет 151 километр. При этом условный диаметр, соединяющий эти пункты (см. приведенные фото и карту), проходит вблизи Воротиловской скважины (геометрического центра кратера). Но тогда Пучеж-Катунский кратер следует поместить уже на четвертое место в списке ударных кратеров Земли.

Что же в итоге? Мы должны констатировать, что есть внутренние разрушения в толще земной коры, которые проявляются на поверхности. Эти процессы определяют размер кольцевой структуры, который, как в нашем случае, не совпадает с диаметром кратера, вычисляемого как предельный размер перемешивания осадочных пород. Чтобы учесть существование двух разных масштабов воздействия на среду, следует, помимо диаметра кратера $D_{кр}$, ввести еще один масштаб – диаметр астроблемы $D_{астр}$. Так, для Пучеж-Катунского кратера $D_{кр} = 80$ км; $D_{астр} = 150$ км. Точно так же можно определить и действительные (лучше было бы назвать их «истинные») диаметры для других астроблем. Очевидно, что в случае наличия водной «оболочки» на поверхности Земли для любого кратера $D_{астр} > D_{кр}$. Если такая оболочка у кратера отсутствует, то $D_{астр} = D_{кр}$.

Наличие ярко выраженных водных дуг – косвенное доказательство многочисленных разломов земной коры. А есть ли прямые указания на это? Да, есть! «Пучеж-Катунская импактная структура приурочена к самому центру наиболее интенсивных деформаций транспрессионного (т. е. сочетающих сдвиг и сжатие – *авт.*) сегмента Владимир-Вятской зоны дислокаций. Такое «прицельное» попадание метеоритного тела не просто в тектоническую зону, разделяющую крупнейшие структуры Восточно-Европейской платформы, но и в ее самый напряженный сегмент, выглядит фантастическим и маловероятным» [2]. Иными словами, прилетевший в наш край астероид запустил схожие по своей природе процессы тектонической перестройки в центре Русской равнины – от Владимира до Вятки. Их максимальная активность наблюдается вблизи кратера и спадает по мере удаления от него. Следует признать, что прилет астероида – важнейшее событие в геологической эволюции Русской платформы.

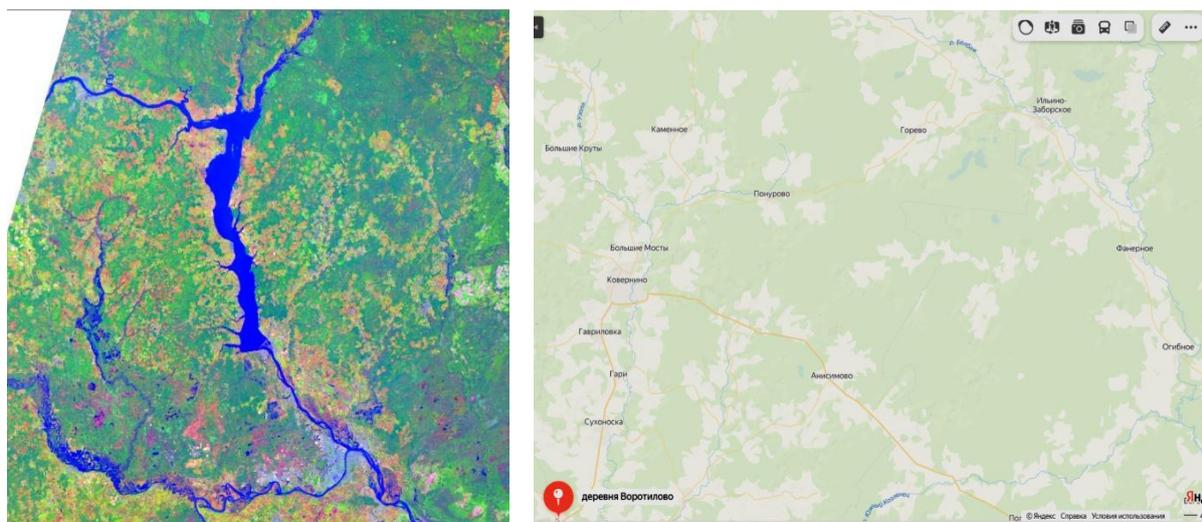


Рис. 2. На фото слева (нижняя половина) по часовой стрелке – реки Ока – Клязьма – Лух – Волга. В правом углу – Стрелка. Справа на карте: река Белбаж, протекающая через Ильино-Заборское и впадающая в Керженец (линия Фанерное – Огибное)

В южной части Пучеж-Катунского кратера, имея протяженную общую границу с ним, с запада на восток пролегла трещина в кристаллическом фундаменте Земли, так называемая Владимиро-Казанская межа. Она хорошо прослеживается спутниковой космической съемкой вдоль долин Клязьмы, низовья Оки и широтного отрезка Волги ниже Нижнего Новгорода. Владимиро-Казанская межа представляет зону сильного дробления земной коры, состоящей из множества мелких, расколотых разломами блоков. Межа разделяет две относительно монолитные, жесткие плиты – южную Сарматскую и северную Варяжскую. Этот гигантский разлом (более 500 км) в центре Русской платформы – тоже следствие удара астероида. Вследствие данного явления образовалась Приволжская возвышенность, вдоль которой, повторяя геометрию подземного разлома между двух плит, проложила в глубокой древности свой путь к Каспийскому морю река Ра (а сейчас повторяет наша Волга). Судя по перепаду высот между фундаментами Сарматской и Варяжской плит, Приволжская возвышенность поднималась когда-то над левобережьем Ра-Волги более чем на 1000 м (возможно и больше). Это были настоящие, величественные горы, но без выхода наружу скальных пород. Со временем, вследствие естественной коррозии, осадочные породы в значительной мере разрушились. Сегодня перепад между правобережьем и левобережьем Волги составляет не более 200 м, но благодаря народной памяти (!) высокий берег сохранил в своем названии гордое определение – «горы» Дятловы, Фадеевы, Перемиловы и т. д.

Теперь о времени прилета астероида. Большинство специалистов оценивают эту дату как около 200 млн. лет назад. Наиболее убедительные измерения, проведенные на основе аргон-аргонового метода ($^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$), дают оценку $196,45 \pm 3,76$ млн. лет назад [3] (в самой статье величина доверительного интервала указана неправильно). Таким образом, временные пределы прилета астероида заключаются в интервале от 192,69 до 200,21 млн. лет назад.

Мы полагаем, что в нашем случае следует говорить о мощном разрушительном воздействии на глубинные слои Земли. Астероид прошел, как

сквозь масло, через двухкилометровый слой осадочных пород, если он в ту пору был таким же, как сейчас, и пробил земную кору.

Полагаем, что оценки размера Пучеж-Катунского астероида в 2–4 км являются заниженными. 150-километровая в диаметре зона разломов и трещиноватости, образовавшаяся в толще коры, позволяет утверждать, что Пучеж-Катунский взрыв был одним из наиболее значительных событий в импактной истории Земли. После удара произошел выброс лавы, т. е. на территории Нижегородской области начал действовать вулкан.

Если мы правы, то в списке крупнейших кратеров Пучеж-Катунскому астероиду предшествует находящийся на третьем месте кратер Чикшулуб, расположенный на полуострове Юкатан (Центральная Америка). Астероид размером в 10 км, упавший здесь 66,5 млн лет назад, образовал кратер диаметром 180 км и проник до глубины 17–20 км. Конечно, масштаб Чикшулубской аномалии значительнее, но если учесть, что мы говорим о Пучеж-Катунской зоне разрушения, находящейся на глубине, то сравнение двух кратеров кажется правомерным. «Американский» астероид вызвал мощную сейсмическую волну, несколько раз обогнувшую земной шар и вызвавшую вулканические извержения в противоположной точке поверхности Земли – в Индии. Синхронно с прилетом астероида в западной и центральной ее частях (плоскогорье Декан) из земных недр по разломам стала вытекать пылающая магма. Она застывала и превращалась в лаву (этот процесс мог повторяться много раз на одной и той же территории). Как результат, на поверхности плоскогорья образовались траппы – ступенчатые плато из горных пород (от шведского *trappa* – лестница). Траппы плато Декан – крупная магматическая провинция. Она сложена базальтовыми породами, толщина которых более 2000 м. Общая площадь траппов составляет около 500 000 км² (рис. 3).

А теперь – внимание! Около 201 млн. лет назад начала образовываться Центрально-атлантическая магматическая провинция (ЦАМП) – крупнейшая континентальная магматическая провинция Земли, занимающая площадь 11 миллионов км² (в 22 раза больше Деканской по площади!).

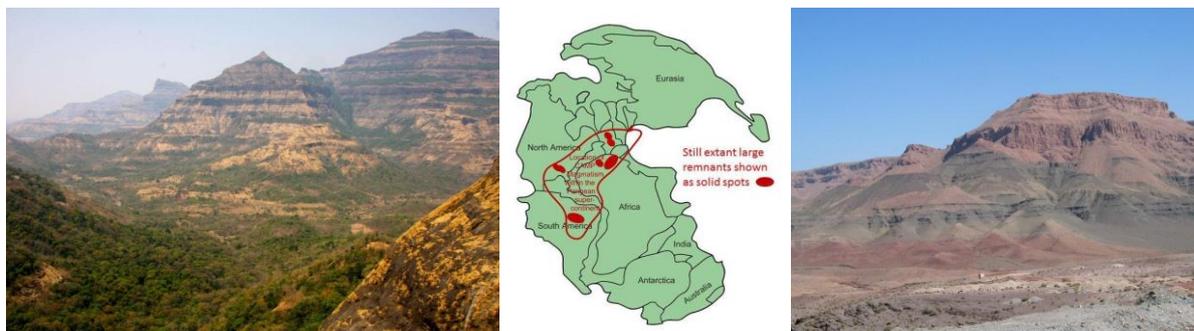


Рис. 3. Слева – траппы плато Декан; в центре – материк Пангея, на карте: Central Atlantic magmatic province (CAMP) – Центрально-атлантическая магматическая провинция, надпись на ней – все еще сохранившиеся большие остатки показаны сплошными пятнами; справа – разрез потока базальтовой лавы из Среднего Атласа, Марокко (пример пород CAMP)

Она состоит в основном из базальта, который сформировался до того, как распался единый материк Пангея. Последующий распад Пангеи создал Атлантический океан, но мощные магматические образования распространились на обширной территории вокруг нынешней центральной части Северной Атлантики, включая крупные отложения на северо-западе Африки, юго-западе Европы, а также на северо-востоке Южной Америки и юго-востоке Северной Америки.

Ранее геологи неизменно отмечали, что какие-либо данные о метеоритах, прилетавших как раз в это время, отсутствуют, и потому образование Центрально-атлантической магматической провинции нельзя связать с фактором внешнего воздействия. Но сейчас ситуация изменилась, и мы, тем самым, получаем еще одно доказательство в пользу большего масштаба Пучеж-Катунского астероида.

Прилет астероида совпадает по времени с началом формирования «атлантических» траппов, и это именно он вызвал вулканическую деятельность на другой стороне планеты. Да и как может быть по-другому, если его «трапповый» эффект оказался в 22 раза сильнее, чем у его Чикшулубского «собрата».

Но и это еще не все интереснейшие следствия падения космического тела. Ученые из Университета Падуи (Италия) обнаружили высокие концентрации углекислого газа магматического происхождения в образцах базальта из Центрально-атлантической магматической провинции. Это подтвердило их гипотезу, согласно которой именно извержения вулканов привели к катастрофическим изменениям климата – глобальному потеплению и подкислению вод Мирового океана, в результате которых произошло триасо-юрское вымирание. И мы вправе заключить, что наблюдалась следующая цепочка процессов: падение Пучеж-Катунского астероида → вулканы ЦАМП → массовые вымирания животных.

К этому стоит добавить, что выброс почвы, землетрясение и цунами, произошедшие в результате падения Чикшулубского метеорита, привели к одному из крупнейших массовых вымираний в биосфере Земли (в том числе гибели динозавров). Так что наше предположение о схожести Пучеж-Катунской и Чикшулубской астроблем полностью оправдывает себя.

Вместо заключения

Исходным моментом предлагаемой концепции является утверждение о связи русел рек (и связанных с ними водоемов) с разломами в земной коре. Разумеется, есть реки, которые текут попросту из-за перепада высот. Но, по наблюдениям геологов, наличие трещин и разломов в земной коре – верная

предпосылка появления над ними водоемов. Это экспериментальный факт, который объясняется теорией Ларина о строении Земли. Согласно ей, ядро планеты состоит не из чистых металлов, как предполагалось ранее, а из соединений металлов с водородом (гидридов). Водород постоянно дегазирует (выделяется) из ядра и движется к поверхности планеты, соединяясь, благодаря своей высокой химической активности, с другими веществами, находящимися у поверхности, в первую очередь с кислородом, образуя воду. Из ее металлогидридного ядра к поверхности текут настоящие водородные реки. Приближаясь к силикатно-окисной коре Земли и активно соединяясь с кислородом, эти водородные потоки превращаются уже в настоящие водные реки. Проникая на ее поверхность через естественные каналы, трещины, разломы, они питают родники, озера и ледники. Изучение образцов пород из Воротиловской скважины (глубина 5374 м), пробуренной в центре Пучеж-Катунского кратера, указывает на достаточно глубокое проникновение астероида внутрь земной коры, а специальные геологические исследования (на основе анализа материалов пород из более чем 180 менее глубоких скважин) позволили говорить об особой Городецко-Ковернинской тектонической зоне внутри кратера с более высоким уровнем трещиноватости и раздробленности пород. На основании этих результатов (и с учетом теории Ларина) мы и связываем появление системы рек в районе кратера с падением астероида.

В частности, так возникла и река Ра (Волга). Нашей великой реке 200 млн. лет, а отнюдь не 5 с небольшим, как считают палеогеологи. И питала великую реку Ра глубинными подземными водами земная дыра, земная рана – Пучеж-Катунский кратер. Через зону дробления кристаллического фундамента, повторяющую округлую форму кратера, через многочисленные трещины и поры подземная вода, скопившаяся под корой, постоянно выдавливалась на поверхность, образовав сначала озеро живописной кольцеобразной формы, а затем, заполнив его до краев и найдя сток, образовала реку Ра (Волгу) в ее течении от Нижнего Новгорода.

Литература

1. Фридман Б.И., Кулинич Г.С. Геологические путешествия по Горьковской области. Горький : Волго-Вят. кн. изд-во, 1990.
2. Колодяжный С.Ю. К вопросу о генезисе Пучеж-Катунской структуры (Восточно-Европейская платформа) // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение геологии. 2013. Т. 88, № 6. С. 3–17.
3. Holm-Alwmark S., Jourdan F., Ferriere L., Alwmark C., Koeberl C. Resolving the age of the Puchezh-Katunki impact structure (Russia) against alteration and inherited $^{40}\text{Ar}^*$ // No link with extinctions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021, **301**, 116–140.

Нейрональный субстрат информационных моделей взаимодействия между компонентами психологической структуры

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

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

²Государственный академический университет гуманитарных наук, Москва

В исследованиях психологических структур (ПС) в системно-эволюционной парадигме было установлено, что в состав каждого компонента ПС входят информационные модели взаимодействий двух родов. Модели 1-го рода обеспечивают циклы взаимодействий индивида с институционализированной предметной областью (ИПО). Модели 2-го рода лежат в основе взаимодействий между компонентами ПС [2, 8].

Субстратной основой каждой модели 1-го рода является группа нейронов с общей специализацией относительно цикла взаимодействия индивида ИПО (см. [3–7]). Актуализации модели 1-го рода соответствует реализация цикла взаимодействия индивида с ИПО в конкретных пространственно-временных условиях, т. е. поведенческий акт.

Для моделей 2-го рода субстратная основа не описана. Их актуализация характеризуется либо через синергические и оппонентные отношения между компонентами ПС (по их проявлениям в изменениях активности нейронов) [1], гл. 10; [4], с. 157, либо через логико-алгебраическую типологию отношений [2, 7].

Цель работы состоит в согласовании описания информационных моделей 1-го и 2-го рода, входящих в состав компонента ПС, в терминах специализированных нейронов, т. е. с точным указанием нейронального субстрата как носителя моделей взаимодействия.

Предполагается, что модели 2-го рода фиксированы в группах нейронов, которые принадлежат взаимодействующим компонентам ПС, в специализациях которых фиксированы специфические модели 1-го рода. Чтобы обеспечивать взаимодействия между компонентами ПС, модели 2-го рода должны принадлежать этим взаимодействующим компонентам. Необходимое условие для обоснования этого предположения – существование нейронов с двойной специализацией: относительно модели 1-го рода, определяющей единство компонента ПС, а также относительно модели 2-го рода, обеспечивающей взаимодействия компонентов ПС. Следует добавить, что в исследовании организации нейрональной активности в сложном пищедобывательном поведении ([1], гл. 10) было обосновано расширенное понимание феномена специализации нейронов, основанное на статистическом выделении групп специализированных нейронов (вероятность активации в определенном акте $p = 1,0$) и нейронов с субспециализациями ($p \geq 0,7$).

Методика

Анализировали активность 484 специализированных нейронов лимбической коры, зарегистри-

рованных в исследованиях А.Г. Горкина и Д.Г. Шевченко [5, 6] у 11 кроликов, которые были обучены выполнению сложного пищедобывательного поведения в двух симметричных циклах на двух сторонах клетки, включающих нажатие на педаль для получения порции пищи в кормушке; в каждом цикле было выделено по 5 поведенческих актов (рис. 1). Для каждого нейрона была выявлена специализация относительно какого-либо из этих актов (см. критерий ниже).

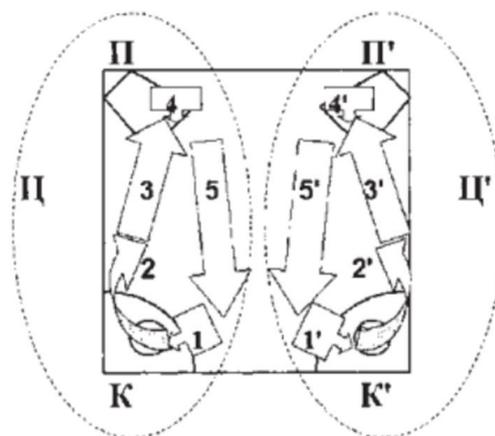


Рис. 1. Схема организации пищедобывательного поведения в экспериментальной клетке.

Овалами помечены два цикла поведения (Ц и Ц'). К и К' – кормушки (автоматическая подача порций пищи), П и П' – педали, включающие подачу пищи.

Стрелками помечены поведенческие акты циклов Ц и Ц': 1 и 1' – опускание морды в кормушку, захват порции пищи; 2 и 2' – поворот к педали; 3 и 3' – подход к педали; 4 и 4' – нажатие на педаль; 5 и 5' – подход к кормушке

Для первичной классификации нейронов использовали иерархический кластерный анализ (within-group linkage, квадрат евклидова расстояния). Матрицу вероятностей активации нейронов (484 строки, 10 столбцов), кластеризовали по значениям вероятности активности каждого нейрона в каждом из 10 поведенческих актов. Для последующей коррекции кластерного решения и описания активности нейронов в терминах специализаций и субспециализаций были применены статистические критерии [1], гл. 10, но в данном исследовании критерии были изменены: для специализации вероятность активации в каком-либо акте $p \geq 0,9$, для субспециализации – $0,8 \geq p < 0,9$.

Результаты и их обсуждение

Кластерный анализ разделил выборку 484 нейронов на 19 групп. Анализ вероятностей активации нейронов в каждом кластере при реализа-

ции 10 актов поведения показал существенные отклонения от принятых критериев распознавания активаций как проявления специализаций или субспециализаций, по-видимому, вследствие статистического характера процедуры и невозможности задания точных критериев в процедуру иерархической кластеризации.

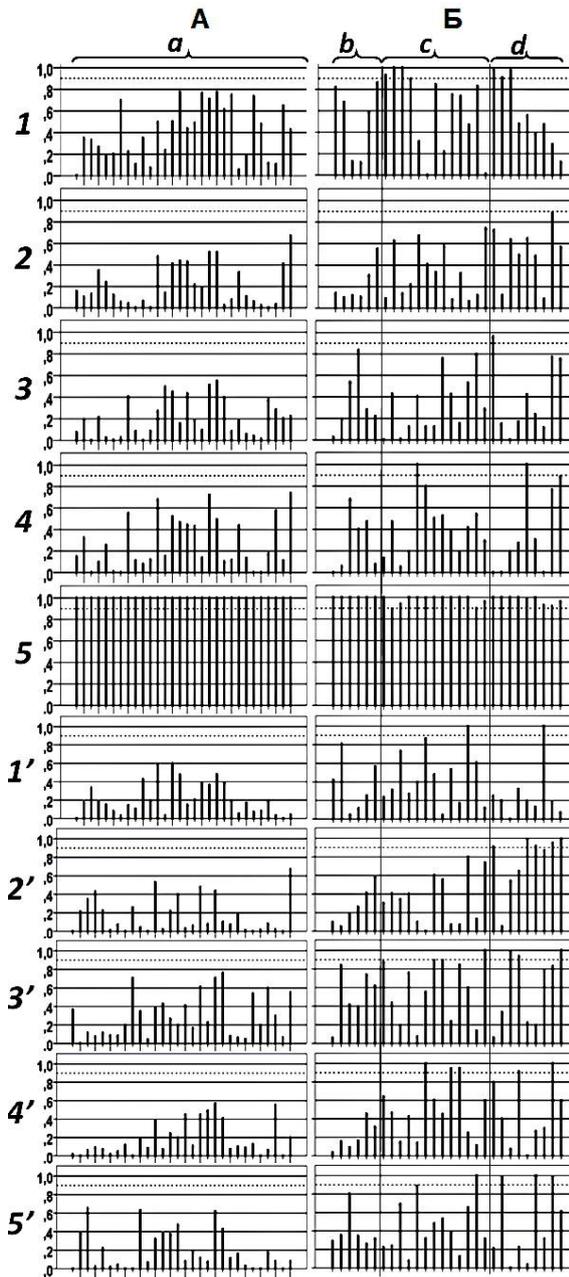


Рис. 2. Вероятность активации множества нейронов, принадлежащих компоненту ПС, связанному с актом 5 (Ц) при реализации поведенческих актов 1–5 (Ц) и 1'–5' (Ц'). Построено по значениям модифицированной матрицы

На рис. 2 по вертикали – 10 фрагментов, представляющих активность данного множества нейронов в каждом из 10 поведенческих актов (1–5, Ц) и (1'–5', Ц'); цифры слева – обозначения актов (см. рис. 1).

Ось ординат на каждом фрагменте – вероятность активации данного нейрона.

Столбики на разных фрагментах с одинаковым положением на оси x характеризуют активность одного и того же нейрона в каждом акте.

Пунктирной линией отмечен критерий специализации ($p \geq 0,9$).

Критерий субспециализации – $0,8 \geq p < 0,9$.

А – подмножество нейронов, обладающих одной специализацией (акт 5); Б – подмножества нейронов с различными соотношениями специализаций и субспециализаций; a, b, c, d обозначают выделенные на всем множестве нейронов подгруппы (отмечены фигурными скобками) с различными соотношениями специализаций и субспециализаций: тонкие вертикальные линии разделяют эти группы: a – с одной специализацией без субспециализаций; b – с одной специализацией и субспециализациями; c – с двумя специализациями и субспециализациями; d – с тремя или четырьмя специализациями и субспециализациями.

В результате сведения одноименных специализаций в одну группу, а также разделения групп нейронов с единственной специализацией и с несколькими специализациями и субспециализациями было сформировано 20 групп. Из 484 нейронов коррекция принадлежности к группе была необходима для 134 нейронов. В результате корректировки вся выборка была разделена на 20 групп, так что каждому компоненту ПС соответствовало 2 группы: одна с единственной специализацией относительно конкретного акта, а другая – со специализацией относительно этого же акта и специализациями и/или субспециализациями относительно некоторых других актов.

На рис. 2 показана активность двух групп нейронов (А и Б), своей специализацией связанных с актом 5. В группе А (подгруппа a) вероятность активации всех нейронов в акте 5 равна 1, но в других актах ни у одного нейрона вероятность активации не достигает критерия специализации или субспециализации ($p \geq 0,8$).

В подгруппе b группы Б каждый нейрон, кроме специализации, имеет также субспециализацию.

Нейроны подгруппы c , кроме специализации относительно акта 5, продемонстрировали специализации относительно других актов – 1, 4, 1', 3', 4', 5' ($p \geq 0,9$), а также субспециализации относительно актов 1, 3, 4, 1', 2', 3', 5' ($0,8 \geq p < 0,9$). Основная характеристика нейронов этой подгруппы – совмещение специализаций относительно двух актов.

Нейроны подгруппы d , кроме специализации относительно акта 5, продемонстрировали специализацию относительно других актов – 1, 2, 3, 4, 1', 2', 3', 4', 5' ($p \geq 0,9$), а также субспециализации относительно актов 2', 3', 4' ($0,8 \geq p < 0,9$). Основная характеристика нейронов этой подгруппы – совмещение специализаций относительно трех и более актов.

Скорректированная матрица частот активности нейронов была модифицирована: нейроны, имеющие две и более специализаций, были включены

во все группы, соответствующие актам каждой из этих специализаций. Модифицированная матрица содержит 610 строк. По значениям этой матрицы построены рис. 2 и таблица 2. Сравнение таблиц 1 и 2 показывает, что изменены характеристики только подгрупп *c* и *d* с множественными специализациями.

Таблица 1

Оценки количества нейронов с различными соотношениями специализаций и субспециализаций в составе компонентов ПС; скорректированная матрица

Оценки	<i>n</i> нейронов в компоненте ПС	<i>n</i> нейронов в подгруппах			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<i>max</i>	71	40	17	16	4
<i>min</i>	34	16	6	5	0
<i>median</i>	48	29	11	8	2

Заметим, что такая модификация позволяет преодолеть парадоксы отнесения нейронов с двумя или большим количеством специализаций только к какой-либо одной из групп и исключает ошибочные решения.

Применение такого распределения нейронов с двумя и большим количеством специализаций требует замены понятия «группа нейронов с общей специализацией относительно определенного акта поведения» конструктом «компонент ПС», поскольку описываемая организация каждой «группы нейронов» и всей их совокупности вследствие перекрытия составов групп определяет такое свойство ПС, как связность (невозможность удалить любую из групп без разрушения целостной организации).

Таблица 2

Оценки количества нейронов с различными соотношениями специализаций и субспециализаций в составе компонентов ПС; модифицированная матрица

Оценки	<i>n</i> нейронов в компоненте ПС	<i>n</i> нейронов в подгруппах			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<i>max</i>	84	40	17	27	10
<i>min</i>	46	16	6	12	2
<i>median</i>	59	29	11	17	5

Полученные результаты не дают оснований для отвержения основного предположения исследования: в группе нейронов, специализация которых обеспечивает взаимодействие индивида с ИПО, выделены подгруппы нейронов, которые по своей специализации входят в состав групп, относящихся к другим компонентам ПС. Соответствие активаций таких подгрупп актуализации других компонентов ПС (двух и более), см. рис. 2, согласуется с предположением, что в активности подгрупп проявляются взаимодействия между компонентами ПС. В исследованиях характеристик активности таких распределенных подгрупп нейронов, по нашему предположению, может проявляться актуализация информационных моделей 2-го рода, ранее описанная в логических терминах отношений *следования*, отношений *XOR* или *IOR*,

ограничивающих одновременную актуализацию компонентов ПС, отношения *AND*, определяющих состав групп одновременно актуализирующихся компонентов ПС [2, 7].

Выявленная в настоящей работе включенность нейронов с одинаковой специализацией в разные компоненты позволяет сделать следующие заключения.

Первое из них – принципиальная нелокальность компонента ПС. Компонент ПС нелокален не только относительно морфологических структур ткани мозга (что хорошо известно), но невозможно и точное перечисление нейронов, принадлежащих конкретному компоненту, поскольку часть из них принадлежит другим компонентам ПС.

Второе заключение состоит в том, что перекрытия составов нейронов, образующих разные компоненты ПС, можно рассматривать как основу связи между этими компонентами. Совокупности нейронов, распределенные на двух или нескольких компонентах, представляют собой субстрат, на котором фиксируются **информационные модели взаимодействия** между компонентами ПС, т. е. модели 2-го рода [2, 7, 8].

На основании полученных результатов можно предложить понимание феномена специализации активности нейронов, общее для двух форм взаимодействий – индивида с ИПО и между компонентами ПС. По нашему предположению, в феномене специализации нейронов проявляется актуализация информационной модели при минимальном обеспечении взаимодействия группы нейронов, необходимое для достижения результата конкретного поведенческого акта. Согласно этому пониманию, информационная модель взаимодействия не может быть фиксирована на единичном нейроне, специализация должна быть общей для множества нейронов. Общая специализация определяет на популяции нейронов группу эквивалентности, которая является носителем единой информационной модели. На правдоподобие объяснения феномена специализации как проявления фиксированной на множестве нейронов информационной модели какого-либо взаимодействия указывают следующие ее свойства: 1) основной диагностический признак специализации – соответствие между устойчиво воспроизводящейся активацией нейрона и содержательной характеристикой конкретного поведенческого акта; семантическое отображение между ними является родовым признаком отношения «моделируемого» (характеристики цикла взаимодействия индивида с ИПО) и «моделирующего» (характеристики общего для группы нейронов свойства); 2) гомоморфизм соответствия содержательных характеристик цикла взаимодействия и характеристик спайкового потока указывают на информационный характер модельного соотношения; 3) сформированная *de novo* специализация нейронов сохраняется и с высокой вероятностью воспроизводится при повторных вариативных реализациях взаимодействий; 4) специализации нейронов формируются в процессе научения новым поведенческим актам [5, 6,

7], а сформированная *de novo* специализация стабильна и сохраняется неопределенно долго (см. [6]); 5) группы нейронов, однородные по специализациям, могут достигать значительного объема.

В данной работе показано, что специализация, общая для множества нейронов, образующих компонент ПС, совместная актуализация которой обеспечивает реализацию конкретного поведенческого акта, может быть реализована в разных подмножествах этой совокупности и включаться в обеспечение других поведенческих актов. Эти подмножества являются носителями различных моделей 2-го рода, обеспечивающих взаимодействие нескольких компонентов ПС. Каждое из этих подмножеств может рассматриваться как носитель специфической модели 2-го рода.

Заключение

Сформулированное представление о феноменах специализации (и субспециализации) нейронов:

1) показывает недостаточность понимания компонента ПС как совокупности нейронов с общей специализацией относительно определенного поведенческого акта;

2) открывает возможность онтологически содержательного соотнесения понятий «психологическая структура», «компонент ПС», «взаимодействие компонентов ПС», «информационные модели взаимодействий», 1-го рода (индивида с ИПО) и 2-го рода (между компонентами ПС);

3) позволяет преодолеть эклектичное совмещение онтологически точной характеристики актуализации модели 1-го рода как активности группы специализированных нейронов и логических, т. е. онтологически неопределенных отношений между компонентами ПС.

Предложенное описание организации групп специализированных нейронов, принадлежащих компоненту ПС, а точнее, образующих сложную организацию ПС на множестве компонентов, обосновывает описание связей между компонентами ПС как взаимодействий информационных моделей 2-го рода, в тех же терминах, как и моделей 1-го рода.

Исследование выполнено по государственному заданию Минобрнауки РФ № 0138-2025-0013.

Литература

1. Александров И.О. Формирование структуры индивидуального знания. М. : Институт психологии РАН, 2006.

2. Александров И.О., Максимова Н.Е. Неоднородные семантические сети в формальном описании организации психологических структур // Искусственный интеллект и принятие решений. 2024. № 2. С. 76–86. DOI: 10.14357120718594240206.

3. 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. М. : ЛЕНАНД. С. 344–352.

4. Горкин А.Г. Фиксация опыта поведения в нейронной активности: монография. М. : РУСАЙНС, 2023.

5. Горкин А.Г., Шевченко Д.Г. Стабильность поведенческой специализации нейронов // Журн. высшей нервной деят. 1990. Т. 40, № 2. С. 291–300.

6. Горкин А.Г., Шевченко Д.Г. Отражение структуры памяти в активности системоспецифичных нейронов // Психол. журн. 1991. Т. 12, № 2. С. 60–69.

7. Максимова Н.Е., Александров И.О. Психологические структуры: системно-эволюционная парадигма. М. : Изд-во «Институт психологии РАН», 2023.

8. Пономарев Я.А. Методологическое введение в психологию. М. : Наука, 1983.

Как рисуют пациенты, дети и нейросети

Н.Ш. Александрова

nina.alexandrova@gmx.net

Как известно, способность реалистично изображать людей, животных, окружающий либо фантастический мир присуща далеко не каждому. В то же время любой взрослый здоровый человек может без труда нарисовать схемы знакомых предметов – лицо человека, фигурка человека, дом, чашка, яблоко и т. п. Какую роль играет данная способность в когнитивной деятельности человека? Когда формируется? Как проявляется нарушение данной способности? Возможно ли полноценное рисование без сформированной способности схематично изображать объекты? Статья посвящена поиску ответов на эти вопросы.

Дети

В книге «Творческий и умственный рост» (1947) Виктор Лоуэнфельд [1] предложил шесть стадий развития рисования: первая стадия (до 2 лет) – каракули; вторая стадия (3–4 года) предсхематическая, первая попытка рисования человека (голова-круг и ноги-линии); третья стадия (5–6 лет) – схема, активное освоение детьми символов и понятий. Лоуэнфельд так определяет понятие схемы в детском развитии: «Схема объекта – это концепция, к которой ребенок в конце концов пришел, которая представляет активное знание объекта ребенком». Четвертая стадия (7–10 лет) – зарождающийся реализм изображений, рисунки содержат множество деталей. Во время пятой псевдонатуралистической стадии (11–13 лет) дети начинают критично относиться к своим рисункам. Заключительная стадия (14–16 лет) является стадией принятия решений. Только одаренные дети, довольные своими рисунками, продолжают рисовать. А все те, кто осознал свою неспособность рисовать «как художник» (а таких подавляющее большинство), оставляют это занятие, но на всю жизнь сохраняют способность схематично изображать предметы.

Для исследования становления способности схематично (узнаваемо) изображать знакомые объекты нами были обследованы 126 детей (5–7 лет) перед поступлением в первый класс общеобразовательной школы [2]. Детям предлагалось нарисовать две серии рисунков (чашка, ведро, кастрюля и слон, жираф, верблюд). Данные предметы различаются между собой четкими признаками. Инструкция: нарисовать просто, но так, чтобы предметы можно было узнать. Полностью справились с заданиями 49 детей, в рисунках у 71 ребенка (пятерым из них было 7 лет) не все предметы могли быть опознаны, эти дети находились на разных стадиях формирования способности узнаваемо изображать предметы. Все дети, умеющие читать, справились с заданиями.

Как мы видим, для большинства детей итогом их многолетней любимой деятельности – рисования – является лишь способность создавать невзрачные схематичные рисунки. Значение данной способности в когнитивной деятельности человека раскрывается при мозговых поражениях.

Пациенты

Одним из видов нарушения рисунка при поражениях мозга является потеря способности схематично изображать знакомые объекты при полностью сохранной способности копировать сложные изображения.

Наблюдается данный симптом при поражении левого полушария (у правшей) в синдроме амнестической афазии, где на первый план в картине когнитивных нарушений выступают затруднения актуализации существительных. Характерным для данного синдрома являются затруднения актуализации распространенных существительных, обозначающих конкретные предметы при более сохранной способности актуализации абстрактных существительных: так, при задании назвать слова, начинающиеся на слог *ра*, пациент после раздумий называет слово *рационализация*, на слог *ко* – *коллорационизм* и т. п., т. е. при данном синдроме слова, имеющие абстрактное значение (схематичное изображение невозможно), актуализируются легче конкретных существительных, обозначающих физические предметы. Также для данного синдрома характерны затруднения в узнавании схематичных рисунков при сохранном узнавании реальных объектов и реалистичных изображений. То есть можно предположить, что у здоровых взрослых существует единая способность осмысления объектов в виде схемы – представление объекта в виде схемы, узнавание в схеме знакомого объекта и изображение объекта в виде узнаваемой схемы. Данная способность выступает как компенсация при правополушарном височном поражении, когда пациенты теряют способность узнавать индивидуальные особенности объектов (синдром более известен как лицевая агнозия (*prosopagnosie*)). Пациенты с данным синдромом почти не испытывают затруднений при узнавании предметов (помогает сохранная левополушарная схема); и лишь рисунки лиц, где одной схеме (два глаза, нос, рот) соответствует бесчисленное множество вариантов воплощений, недоступны для узнавания.

Схематичный рисунок как когнитивный процесс

Схематичные, т. е. обобщенные, изображения объектов отражают главные функциональные или

категориальные признаки этих объектов. В работе Глезерман [3] описаны трехуровневый анализ зрительных предметных образов с выделением их признаков и процесс структурирования выделенных признаков, т. е. синтез, образующий левополушарные представления. Эта способность присуща всем здоровым людям, т. е. является видоспецифической функцией. В течение первых лет жизни аналитико-синтетическая обработка нерасчлененного правополушарного зрительного восприятия приводит к формированию и, вероятно, накоплению функциональных схем тех конкретных предметов, с которыми ребенок соприкасается. Данный навык имеет четкие сроки формирования в онтогенезе и протекает как саморазвитие. Наполнение левополушарного хранилища схем происходит поэтапно и зависит от индивидуального опыта индивида. Способность узнаваемо изобразить объект означает сформированность (в детстве) или сохранность (при мозговых поражениях) аналитико-синтетической деятельности по выделению в воспринимаемом объекте функциональных и категориальных признаков. Данная способность теснейшим образом связана с названием, т. е. имя объекта сливается воедино с его внешним видом (образом), функциональным предназначением и категориальной отнесенностью [4, 5].

У одаренных детей и взрослых способность схематично изобразить объект становится необходимой опорой для изображений в любом художественном стиле.

Нейросети

Для совершенствования генерируемых нейросетями изображений необходим анализ ошибок. Ошибки могут быть явными, напоминающими рисунки ребенка, который не освоил грамматических категорий и не различает предлогов, совершенного и несовершенного видов глаголов и т. п. Это, к примеру, неспособность изобразить машину, которая едет в гору или с горы, птицу на дереве и над деревом, мальчика, который одевается и оделся, и т. п. Но в сгенерированных изображениях также встречаются особенности, которых нет ни в рисунках детей, ни в реалистичной живописи, это *нарушение схемы тела человека и животных*. Данная особенность сгенерированного рисунка может сделать его неприятным для просмотра либо смешным:

1) задание для рисунка: *мальчик чистит зубы*, картинка: верхняя часть туловища мальчика «стоит» в раковине и, улыбаясь, держит вертикально зубную щетку, нижней части туловища нет;

2) задание для рисунка: *мальчик стоит на полу и чистит зубы*, картинка: верхняя и нижняя части туловища мальчика сдвинуты относительно друг друга, в живом организме такое невозможно;

3) задание для рисунка: *лиса бежит за зайцем*, картинка: лиса без головы, но с двумя хвостами – хвост спереди и хвост сзади или лиса с головой, но с двумя хвостами (один хвост пушистый, второй тонкий). Зайца либо нет на рисунке, либо он мало похож на зайца – окрас как у лисы.

При изображении животных нередко проявляется отсутствие схемы животного: куры с двумя головами, зайцы с четырьмя ушами и т. п.

Заключение

Анализ генерируемых нейросетями изображений и сравнение их с рисунками детей и пациентов поможет, прежде всего, глубже понять природу человека. Вероятно, в биологическом фундаменте, который получает человек при рождении (видовые знания), заложена роль головы как основного органа у человека и у животных, а также целостность восприятия живого организма. При генерации изображений необходимо учитывать эти основы человеческого восприятия.

Изображение предмета человеком – картинка, говорящая о функции предмета и его категориальной принадлежности, способность к подобному изображению приобретает ребенком имплицитно, т. е. фактически без обучения (саморазвитие). Изображение действия человеком предполагает точное понимание значения глагола и представление о возможной ситуации, где это действие может произойти. Так, для генерации картинки *девочка кормит голубей* кроме схемы *девочка* необходимо понимание глагола *кормит* (не ест, не пьет и т. п.), схематичное представление о голубе (одна голова, две лапки и т. п.), представление о том, чем и как кормят голубей (этим определяется поза того, кто кормит), где это действие может происходить (площадь, парк) и где не может (кровать). Смогут ли нейросети генерировать подобные изображения, покажет время.

Литература

1. Lowenfeld Viktor. 1947. Creative and mental growth. https://dn790001.ca.archive.org/0/items/creativementalgr00lowe_0/creativementalgr00lowe_0.pdf.
2. Александрова Н.Ш. Формирование способности схематического изображения объектов в онтогенезе (Детские рисунки) // Проблемы патологии развития и распада речевой функции. СПб, 1999. С. 25–31.
3. Глезерман Т.Б. Психофизиологические основы нарушения мышления при афазии. М., 1986. С. 40.
4. Александрова Н.Ш. Схематичный рисунок как когнитивный процесс и почему пациенты с лицевой агнозией не узнают лица // Первый нац. конгресс по когнитивным исследованиям, ИИ и нейроинформатике. Сборник научных трудов. Часть 1. Москва : Издательство «МИФИ», 2021. С. 285–288.
5. Александрова Н.Ш. Зрительные агнозии и двойственность зрительного опознания // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях-2019. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2019. С. 22–26.

Квантовые аналогии процессов познания и эффективная квантовость нейросетей

А.К. Алексеев

МФТИ, Долгопрудный, Моск. обл.

Достаточно давно и интенсивно в физической литературе [1–3] обсуждаются вопросы связи разума и материи, а именно взаимодействие между квантовым объектом и наблюдателем, сознанием, разумом, подозрительно напоминающим душу, а иногда так прямо и называемым («Until not many years ago, the «existence» of a *mind or soul* would have been passionately denied by most physical scientists» [1]). В наиболее радикальной интерпретации квантовой механики, обозначаемой как *кубизм (qbizm)* [4, 5], подчеркивается Байесовская (субъективная) природа квантовой вероятности, вплоть до утверждения, что волновая функция существует лишь в голове наблюдателя.

С другой стороны, аналогии между процессами познания, принятия решения, и процессами измерения в квантовой механике достаточно многочисленны и регулярно отмечаются [6–12] психологами и социологами. В частности, существуют аналогии между общественными опросами (дающими вероятность набора ответов и влияющими на состояние системы) и квантовым измерением (коллапсом волновой функции):

1. Сознание может находиться в состоянии суперпозиции различных мнений (имеющих разную вероятность). После получения некоторого ответа, при немедленном повторном опросе он сохранится, что аналогично коллапсу волновой функции при измерении.

2. Частым опросом (измерением), повторяющим одинаковый вопрос, можно заморозить эволюцию мнения (эффект Зенона).

3. Разный порядок вопросов (из одного набора) дает разную вероятность ответов.

4. Разные последовательности вопросов (использующие разные базисы мнений) дают разную вероятность ответов, что соответствует принципу дополнительности (complementarity).

Вне вопросов, связанных с измерениями, отмечаются и явления, аналогичные интерференции (усилению или гашению) некоторых вероятностей (что аналогично свойствам уравнений Шредингера – Маделунга).

Таким образом, неколмогоровская Байесовская вероятность, характерная для квантовой механики, активно используется и при описании психологических эффектов.

Такая ситуация не может не вызывать многочисленных вопросов. Первым, естественно, возникает вопрос, каким же образом в нашем классическом мозгу реализуются квантовые модели.

Одним из вариантов ответа может быть предположение, что наш мозг не такой уж и классический. Безусловно, на самом нижнем (микро) уровне все процессы в мозге (как и везде) являются

квантовыми. Но в обычной жизни мы этого не видим, так как их взаимодействие обычно приводит к эффективной (*emergent*) классичности (за счет «декогеренции»), как это описано, например, в работе [13]. Однако уже несколько десятилетий происходит поиск физических моделей, которые могли бы реализовать квантовые алгоритмы сознания [14–17]. К сожалению, несмотря на некоторые квантовые эффекты, действительно обнаруженные в живых системах на макроуровне [18], в настоящее время квантовые механизмы сознания (на физическом уровне, *hardware*) с достаточной убедительностью не подтверждены ни теоретически, ни экспериментально. С другой стороны, имеются работы, в которых описано, как классические системы эмулируют квантовое поведение (в частности, запутанность [19, 20]). Поэтому нельзя исключить того, что наш мозг, благодаря огромному числу нейронов и связей между ними, а также наличию в них шума, реализует в конфигурационном пространстве некоторые аналогии квантовых процессов. К сожалению, модели мозга, на которых можно было бы это проверить, в настоящее время отсутствуют.

Однако, если предположить, что наш мозг является некоторым вариантом нейросети, то можно попробовать построить алгоритмы работы нейросетей, которые будут проявлять эффективную (*emergent*) квантовость. Следует отметить, что в квантовых моделях вероятность используется двумя способами. Уравнение Шредингера, что особенно прозрачно видно в форме Маделунга (гидродинамическая форма уравнения Шредингера, полученная при следующей параметризации волновой функции),

$$\begin{aligned} \psi(t, x) &= \sqrt{\rho(t, x)} \exp(iS(t, x) / \hbar), \\ u_k &= \partial S / \partial x_k : \\ \partial \rho / \partial t + \partial(u_k \rho) / \partial x_k &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

и

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(V - \frac{1}{\sqrt{\rho}} \frac{\partial^2 \sqrt{\rho}}{\partial x_k^2} \right) \quad (2)$$

описывает обратимую эволюцию вероятности, измерение (по фон Нейману) описывает необратимое изменение вероятности (редукцию волновой функции):

$$\rho_0 = |\psi_1\rangle\langle\psi_2| = \begin{pmatrix} c_1^2 & c_1 c_2^* \\ c_1^* c_2 & c_2^2 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{measurement}} \rho = \begin{pmatrix} c_1^2 & 0 \\ 0 & c_2^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Моделирование квантового уравнения Шредингера – Маделунга с помощью классических структур (в частности, нейросетей) в настоящее время достигается многими способами. В частно-

сти, в работе [21] обсуждается построение такого ансамбля нейросетей для моделирования уравнения Маделунга, в работе [22] показано, что решетка из классических битов под действием стохастических матриц демонстрирует квантоподобное поведение, в работе [23] рассматривается возможность использования нейросетей, обучаемых уравнениями, (PINN, *physics informed neural nets*, физически мотивированных нейросетей) [24] для решения уравнений типа Шредингера. Например, для уравнений (1), (2) PINN реализуется с помощью минимизации невязки типа

$$\varepsilon_{\delta} = \sum_{k,m} (\delta\rho_{km})^2 + \sum_{k,m,j} (\delta u_{j,km})^2, \quad (4)$$

где $\delta\rho / \delta t + \partial(u_k\rho) / \partial x_k = \delta\rho, \dots$ (5)

В рамках этого доклада представляет также интерес стохастический байесовский вариант нейросетей [25, 26], который позволяет обрабатывать распределения вероятностей. При этом обучение имеет вид

$$P_0(w) \rightarrow P(w|D) = \frac{P(D|w)P(w)}{\int P(D|w)P(w)dw}, \quad (6)$$

а работа сети усредняется

$$\langle f(y) \rangle = \int f(y, w)P(w|D)dw. \quad (7)$$

Вариант PINN, основанный на байесовской нейросети, также вполне реализуем [27, 28].

Вообще говоря, процесс квантового измерения с вероятностной точки зрения имеет много общего с байесовским обновлением, однако работы по использованию нейросетей в этом направлении автору не известны. Однако, по мнению автора, стохастический Байесовский вариант нейросетей можно достроить с помощью дополнительного слоя, осуществляющего проекцию и перенормировку вероятностей типа (3), так чтобы моделировать квантовое измерение (редукцию волновой функции). Таким образом, допустима возможность объединения подхода PINN и байесовских нейросетей для моделирования как уравнений типа Маделунга, так и процессов измерений с помощью байесовского обновления.

В качестве альтернативы можно отметить вариационный подход [29–31], в котором байесовская механика (+свободная энергия) рассматривается как основа для процессов познания в мозге и в нейросетях.

Заключение

В квантовой механике одним из основных вопросов является взаимодействие между квантовой системой и наблюдателем, разумом. С другой стороны, психологи и социологи нашли достаточно много экспериментальных подтверждений того, что механизм принятия решений человеческим разумом имеет аналогии с процессом измерений в квантовой механике.

Вопрос, как мозг реализует квантовые алгоритмы, может иметь два ответа:

на уровне *hardware* (а la квантовый компьютер) или

на уровне *software* (эффективная (*emergent*) квантовость классического мозга).

Поиски квантовых процессов в человеческом мозгу убедительного экспериментального подтверждения пока не дали. Возможно, что аналогии с нейросетями могут дать информацию о потенциальном существовании эффективной квантовости мозга.

В данной работе рассмотрена возможность существования эффективной квантовости нейросетей (на классической элементной базе), полученных синтезом PINN, моделирующей уравнение Шредингера – Маделунга, байесовских нейросетей и измерения на основе байесовского обновления.

Литература

1. *Wigner E.* Remarks on the mind-body question. *The Scientist Speculates*, I. J. Good, ed. (London: William Heinemann, Ltd.), 1961.
2. *Bohm D.* A new theory of the relationship of mind and matter // *Philosophical Psychology*. 1990. V. 3, no. 2. P. 271–286.
3. *Chalmers D.J. and McQueen K.J.* Consciousness and the Collapse of the Wave Function // *ArXiv:2105.02314v1 [quant-ph]*. 5 May, 2021.
4. *Caves C.M., Fuchs Ch.A., and Schack R.* Quantum probabilities as Bayesian probabilities // *arXiv:quant-ph/0106133v2*. 14 Nov, 2001.
5. *Fuchs Ch.A. and Stacey B.C.* QBism: Quantum Theory as a Hero's Handbook // *arXiv:1612.07308v3*. 26 Jul, 2019.
6. *Yearsley J.M., Busemeyer J.R.* Quantum cognition and decision theories: A tutorial // *Journal of Mathematical Psychology*. 2016. V. 74, no. 5. P. 99–116.
7. *Yearsley J.M.* Advanced tools and concepts for quantum cognition: A tutorial // *Journal of Mathematical Psychology*. 2017, no. 78. P. 24–39.
8. *Busemeyer J.R. and Wang Zh.* What Is Quantum Cognition, and How Is It Applied to Psychology? // *Current Directions in Psychological Science*. 2015. V. 24(3). P. 163–169.
9. *Trueblood J.S., Yearsley J.M., Pothos E.M.* A Quantum Probability Framework for Human Probabilistic Inference // *Journal of Experimental Psychology: General*. 2017. V. 146, no. 9. P. 1307–1341.
10. *Busemeyer J.R.* Introduction to Quantum Probability for Social and Behavioral Scientists, 2009. In: Bruza P., Sofge D., Lawless W., van Rijsbergen K., Klusch M. (eds) *Quantum Interaction. QI 2009. Lecture Notes in Computer Science*. V. 5494. Springer.
11. *Yearsley J.M., Barque-Duran A., Scerrati E., Hampton J.A. & Pothos E.M.* The triangle inequality constraint in similarity judgments // *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2017. 130(Pt A). P. 26–32.
12. *Basieva I., Pothos E., Trueblood J., Khrennikov A., and Busemeyer J.* Quantum probability updating from zero priors (by-passing Cromwell's rule) // *J. Math Psych.* 2016. V. 77, no. 2. P. 37–50.
13. *Nation Ch. and Porras D.* Taking snapshots of a quantum thermalization process: emergent classicality in quantum jump trajectories // *arXiv:2003.08425v2 [quant-ph]*. 21 Oct, 2020.
14. *Hameroff S.R., Penrose R.* Conscious events as orchestrated spacetime selections // *Journal of Consciousness Studies*. 1996. V. 3, no. 1. P. 36–53.

15. *Schwartz J.M., Stapp H.P. and Beauregard M.* Quantum physics in neuroscience and psychology: a neurophysical model of mind–brain interaction // *Phil. Trans. R. Soc. B.* 2004. V. 360, no. 1458. P. 1309–1327.
16. *Fisher M.P.A.* Quantum cognition: The possibility of processing with nuclear spins in the brain // *Ann. Phys.* 2015. V. 362. P. 593–602.
17. *Gassab L., Pusuluk O., Cattaneo M., and Müstecaplıoğlu O.E.* Consciousness from a Quantum Information Science Perspective // arXiv:2501.03241v2 [q-bio.NC]. 26 Feb, 2025.
18. *Ritz Th. et al.* Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass // *Nature.* 2004. V. 429, no. 13. P. 177–180.
19. *Deymier P.A., Runge K., Hasan A.,* Implementation of Deutsch and Deutsch–Jozsa-like algorithms involving classical entanglement of elastic bits // *Wave Motion.* 2022. V. 113. 102977.
20. *Onggadinata K., Kurzynski P., and Kaszlikowski D.* Qubit from the classical collision entropy // arXiv:2205.00773v2 [quant-ph]. 12 Jan, 2023.
21. *Katsnelson M.I. and Vanchurin V.* Emergent Quantumness in Neural Networks // arXiv:2012.05082v1, 2020.
22. *Slagle K. and Preskill J.* Emergent Quantum Mechanics at the Boundary of a Local Classical Lattice Model // arXiv:2207.09465v3 [quant-ph]. 5 Jul, 2023.
23. *Mattheakis M. et al.* First principles physics-informed neural network for quantum wavefunctions and eigenvalue surfaces // *Machine Learning and the Physical Sciences workshop, NeurIPS, 2022.*
24. *Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E.,* Physics informed deep learning (part I): Data-driven solutions of nonlinear partial differential equations // arXiv:1711.10561, 2017.
25. *Khan M.E., Rue H.* The Bayesian Learning Rule // ArXiv:2107.04562v4 [stat.ML]. 2024.
26. *Bhattacharya S., Liu Z., Maiti T.* Variational Bayes Neural Network: Posterior Consistency, Classification Accuracy and Computational Challenges // arXiv:2011.09592v1, 2020.
27. *Flores P., Graf O., Protopapas P., Pichara K.* Improved Uncertainty Quantification in Physics-Informed Neural Networks Using Error Bounds and Solution Bundles // arXiv:2505.06459v1 [cs.LG]. 2025.
28. *Liu Yang, Xuhui Meng, George Em Karniadakis,* B-PINNs: Bayesian Physics-Informed Neural Networks for Forward and Inverse PDE Problems with Noisy Data // arXiv:2003.06097v1 [stat.ML]. 2020.
29. *Bogacz R.* A tutorial on the free-energy framework for modelling perception and learning // *Journal of Mathematical Psychology.* 2017. V. 76. P. 198–211.
30. *Sakthivadivel D.A.R.* A Worked Example of the Bayesian Mechanics of Classical Objects // arXiv:2206.12996. 2022.
31. *Ramstead M.J.D., Friston K., Hipolito I.* Is the free-energy principle a formal theory of semantics? From variational density dynamics to neural and phenotypic representations // *Entropy.* 2020. V. 22, no. 8. P. 889–901.

К методологии когнитивных исследований

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

Под зонтиком когнитивных наук собралось огромное разнообразие научных направлений, участники которых чувствуют, что работают на одном поле, но обычно слабо понимают, что делают их соседи. Поэтому и чужие результаты плохо используют, и свои не лучше передают. При этом за многие годы результатов накопилось очень много, а очевидно необходимая их интеграция плохо получается. Оправдание этому – сложность и многоступенчатость процессов получения и применения знаний. И для работы на каждой ступени требуется владение специфическим ремеслом, на освоение которого требуются годы. И времени не хватит, чтобы все эти подробности соседу объяснить. Да и у него на свои дела уходят годы. И это – когнитивная проблема! В докладе делается попытка начать расставлять на поле когнитивных исследований реперы, которые помогли бы исследователям ориентироваться и сопоставлять свои результаты и результаты соседа, чтобы понимать, согласуются ли они или противоречат друг другу.

Этапы эволюции когнитивных способностей

По мнению автора, когнитивными (познавательными) способностями обладали уже первые многоклеточные [1–3], тело которых было объемным, т. е. все его диаметры существенно превышали размер клетки. Это ограничивало возможности диффузионного транспорта в энергетическом и пластическом обеспечении организма. Поэтому многоклеточные могут быть жизнеспособными только потому, что их клетки сгруппированы вблизи трех развитых поверхностей с большой площадью, где происходит диффузионный обмен кислородом и питательными веществами из окружающей среды¹. У млекопитающих, например, такими поверхностями являются:

- ветвящиеся легкие,
- ветвящаяся система артериальных и венозных кровеносных сосудов,
- ворсинчатые стенки тонкого кишечника.

Для таких животных *синхронная эволюция топологической структуры и способности к целенаправленной макроскопической подвижности* являются непреложным фундаментальным механизмом их выживания.

¹ У млекопитающих, например, такими поверхностями являются ветвящиеся легкие, ветвящаяся система артериальных и венозных кровеносных сосудов, ворсинчатые стенки тонкого кишечника.

Способность к макроскопическому целенаправленному движению предполагает наличие у животного *сенсорных систем* для восприятия внешнего мира и *согласованных когнитивных моделей внешнего мира и собственного тела*, позволяющих управлять целенаправленным движением. Таким образом, эти животные были первыми обладателями когнитивной способности и первыми наблюдателями на Земле.

С философской точки зрения это означает, что в эволюции жизни на Земле реализовалась *первая когнитивная рекурсия* – сложный самоорганизующийся мир отобразился в самом себе. Это отображение будем считать эквивалентным или хотя бы близким к введенному *Jakob von Uexkül* понятию *Umwelt* [4] – субъективного внутреннего мира животного.

Внутренние субъективные миры разных животных не совпадают, хотя и могут пересекаться. В работе [3] проведена оценка эволюционного времени первой рекурсии – 541/515 млн лет назад.

Если первая рекурсия связана с возникновением многоклеточности, то *вторая когнитивная рекурсия* связана с возникновением самосознания и эмоций. В ходе эволюции *Umwelt* некоторых животных усложнился, и они осознали самих себя. Если следовать Нью-Йоркской декларации о сознании животных [5], то с высокой вероятностью «сознательным опытом» обладают млекопитающие и птицы – около 200 млн лет назад [6]. Не исключено, что сознательным опытом обладают «все позвоночные и многие беспозвоночные».

Наконец, *третья когнитивная рекурсия* совсем молода, и в каком-то смысле обратна первым двум. Она заключается в том, что *Homo Sapiens* приобрел способность создавать в своем сознании объекты, не существующие в окружающем мире (химеры) и предъявлять их ему (манифестировать) в формате различных художественных произведений – картин, музыки, скульптур и мелкой пластики, литературных произведений и др. Наиболее древней известной химере – скульптуре человекольва, сделанной из бивня мамонта, – около 40 тыс. лет [7].

Так как эволюция не имеет замысла, то субстратные предпосылки рекурсий возникали по самостоятельным причинам. Например, *первая когнитивная рекурсия* была порождена феноменом многоклеточности, который возник вследствие того, что у некоторых одноклеточных из-за генетических изменений полное разделение клеток при делении стало затрудненным.

Далее будем рассматривать все три когнитивные рекурсии как самые крупномасштабные репе-

ры. Начнем далее с выделенных выше курсивом сенсорных систем, согласованных когнитивных моделей внешнего мира и собственного тела многоклеточного животного.

Первая когнитивная рекурсия. Сенсорные системы

Первичные входные данные, обеспечивающие необходимое для выживания восприятие *окружающего мира, соседних животных и самого себя*, всегда являются с физико-химическими стимулами. При этом доступны для восприятия всего три их типа:

- *постоянные и переменные электромагнитные поля*, которым, в зависимости от устройства рецептора и обработки его сигналов, могут соответствовать разные модальности восприятия, например, восприятия света, цвета, тепла и боли, а также неизвестные нам модальности восприятия животных, например слабоэлектрических рыб, использующих для ориентации статические электрические поля;
- *постоянные и переменные поля механических давлений*, которым могут соответствовать модальности прикосновения, тяжести, громкости и высоты звука, тепла и боли, а также неизвестные нам модальности восприятия животных, например, летучих мышей, использующих для ориентации в пространстве и обнаружения добычи ультразвуковое излучение или рыб, принимающих звуковое излучение боковой линией;
- *химический состав и концентрация некоторых веществ*, которым, в зависимости от устройства рецептора и обработки его сигналов, могут соответствовать вкус и запах, а также неизвестные нам модальности восприятия у животных.

Ничего другого для восприятия органами чувств природа не создала. Мы не чувствуем радиации, гравитации, состава атомных ядер и пр. Все многообразие ощущений, по крайней мере известных человеку, порождается особенностями конструкции рецепторов и их полей, создающих различающиеся сигнальные паттерны, а также психологической интерпретацией. По-видимому, и у других животных также.

Первая когнитивная рекурсия. Когнитивные модели

Поскольку пока что речь идет о согласованных когнитивных моделях окружающего мира и тела, предназначенных для управления направленным движением, – введем реперы моделей *интерпретаторов сенсорных сигналов и планировщиков действий*.

Интерпретаторы будем подразделять на следующие:

- *внешнего сенсорного потока*,
- *проприоцепции*,

- *непроизвольных сигналов от животных-соседей (в силу важности особо выделены из внешнего сенсорного потока)*.

К планируемым действиям будем относить:

- *перемещения тела – локомоции*,
- *манипуляции (рабочие движения тела и конечностей)*.

Таким образом, выделяются более детальные реперы на поле тематики когнитивных исследований.

Первая когнитивная рекурсия. Исполнительные механизмы – акторы

Согласованные модели интерпретаторов сенсорных потоков и планировщиков действий позволяют управлять исполнительными механизмами. Обычно это *мышечные механизмы*, осуществляющие

- *локомоции*,
- *манипуляции*.

В редких случаях акторы генерируют электрические поля, как скаты, выделяют химические вещества, как сунсы, меняют окраску, как хамелеоны.

Когнитивные модели 2-й и 3-й рекурсии

Вторая рекурсия, породившая самосознание и эмоции у многих видов [4], создала и новое поле для когнитивных исследований. Однако оно начало осваиваться лишь в 20-м веке энтузиастами, противостоявшими давлению психологов, которые, наследуя клерикальные подходы, считали человека сингулярным созданием, принципиально отличающимся от животных. Поэтому научные данные еще только накапливаются. Что касается реперов, то к ним отнесем *интерпретаторы произвольных сигналов от животных-соседей, планировщики произвольных сигнальных движений окружающим животным – жесты и мимика, звуки и иные манифестации*.

Однако научных данных о человеке собрано много, включая психофизиологические данные. Эти данные касаются прежде всего устной и письменной речи, где человек безусловно является лидером, а также творчества, когда внутренний мир человека не только осознается им, но и изменяется, отображаясь во внешнем мире произведениями искусства и тем самым изменяя его.

Высказанные соображения коротко отображены в **Приложении**. В средней и левой колонках отображены самые крупные составляющие когнитивной системы животного. Правая колонка описывает физические и химические поля, через которые поступает любая первичная когнитивная информация. Курсивом обозначена недоступная для животного средней колонки информация. После каждого подзаголовка «когнитивная рекурсия» в таблицу внесено то, что она добавляет. Каждый из предложенных реперов можно пополнить детализирующими его подробностями. Но предложенная систематизация, пусть даже и не в

слишком удачном отображении, позволит лучше сориентироваться и понять действия коллег, а также объяснить свои.

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

Литература

1. *Антонец В.А.* Пространственно-временные характеристики диффузии молекул предопределили топологическую организацию многоклеточных животных и возникновение у них познавательной способности // *Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях-2023. Труды VII Всероссийской конференции.* Н. Новгород : Институт прикладной физики РАН. 2023. С. 7–9.

2. *Antonets V.A.* About the topological structure of multicellular animals // *Biophysical Reviews, The 7th Cong-*

ress of Biophysicists of Russia – conference proceedings, S4.231, <https://doi.org/10.1007/s12551-023-01150-w>.

3. *Antonets V.A.* On the estimation of the emergence of cognitive ability during biological evolution // *Biophysical Reviews, The 7th Congress of Biophysicists of Russia – conference proceedings,* S5.336, <https://doi.org/10.1007/s12551-023-01150-w>.

4. *Uexküll J.* *Umwelt und Innenwelt der Tiere.* Berlin, Springer, 1909. 276 p.

5. *Andrews K., Birch J., Sebo J., and Sims T.* Background to the New York Declaration on Animal Consciousness, URL:<https://nydeclaration.com> (дата обращения: 28.06.2025).

6. *Brusatte S.* *The Rise and Reign of the Mammals: A New History, from the Shadow of the Dinosaurs to Us.* Pan Macmillan UK. 2022. 512 p.

7. *Floss H.* Die Kleinkunst des Aurignacien auf der Schwäbischen Alb und ihre Stellung in der paläolithischen Kunst. Das Aurignacien und die Anfänge der Kunst in Europa (Colloque Internationale Fachtagung Aurignac, 16-18.9.2005) Éditions Musée-forum Aurignac, cahier 4, 2007. P. 295–316.

Животное/человек-сосед	Животное	Окружающая среда
1-я когнитивная рекурсия		
Сенсоры	Сенсоры	
<i>природной среды</i>	природной среды	постоянные и переменные электромагнитные поля
<i>себе подобных</i>	себе подобных	постоянные и переменные поля механических давлений
<i>проприорецепторы</i>	проприорецепторы	химический состав и концентрация некоторых веществ
		Больше ничего нет! Все модальности и всё многообразие ощущений порождается особенностями конструкций рецепторов и их полей, а также психологической интерпретацией.
Когнитивные модели	Когнитивные модели	
интерпретаторы	интерпретаторы	
<i>внешнего сенсорного потока</i>	внешнего сенсорного потока	
<i>непроизвольных сигналов от животных-соседей</i>	непроизвольных сигналов от животных-соседей	
<i>проприорецепции</i>	проприорецепции	
планировщики взаимодействия	планировщики	
<i>локомоций (перемещений тела)</i>	локомоций (перемещений тела)	
<i>манипуляций</i>	манипуляций	
акторы	акторы	
<i>локомоций (перемещений тела)</i>	локомоций (перемещений тела)	
<i>манипуляций</i>	манипуляций	
2-я когнитивная рекурсия		
Когнитивные модели	Когнитивные модели	
интерпретаторы	интерпретаторы	
<i>произвольных сигналов от животных-соседей (жесты, мимика)</i>	произвольных сигналов от животных-соседей (жесты, мимика)	
<i>звуков</i>	звуков	
<i>иных манифестаций</i>	иных манифестаций	
Планировщики коммуникационных сигналов	Планировщики коммуникационных сигналов	
<i>произвольных сигналов животным-соседам (жесты, мимика и иные манифестации)</i>	произвольных сигналов животным-соседам (жесты, мимика и иные манифестации)	
Актеры коммуникационных сигналов	Актеры коммуникационных сигналов	
<i>звуков, жестов, мимики и иных манифестаций</i>	звуков, жестов, мимики и иных манифестаций	
3-я когнитивная рекурсия		
Когнитивные модели	Когнитивные модели	
<i>взаимодействия нейронов мозга</i>	взаимодействия нейронов мозга	
<i>планировщиков творческих актов</i>	планировщиков творческих актов	
Результаты творческих актов	Результаты творческих актов	
<i>речь, тексты (стихи, проза, формулы), картины, чертежи скульптуры (пластика, танцы), звуки (музыка, песни) и пр.</i>	<i>речь, тексты (стихи, проза, формулы), картины, чертежи скульптуры (пластика, танцы), звуки (музыка, песни) и пр.</i>	

Об эволюции в неравновесной среде

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

Ранее [1–3] автором была сделана попытка определить на эволюционной оси время возникновения первого наблюдателя на Земле, отождествляемое с временем возникновения организмов, обладающих познавательной способностью. Эта попытка основывалась на изменении методологического подхода к исследованию сознания и мышления, стимулированного тем, что тысячи работ в этой области в основном сводятся к дискуссиям психологов и философов об определении этих понятий. Вопрос о времени возникновения сознания и мышления в их постановках не может быть сформулирован как эмпирический. Это означает, что при таком подходе невозможно построить теорию, удовлетворяющую требованию фальсифицируемости [4], т. е., по сути, возможности экспериментальной проверки. Вопрос же о времени возникновения познавательной способности является эмпирическим. И решения этого вопроса могут сколь угодно долго проверяться на справедливость.

Задачу удалось 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. Хотя поведение биологических систем не может быть описано исключительно в рамках физических закономерностей, но и нарушать их оно не может. Таким образом, физические ограничения играют роль правил отбора.

Результат проведенного рассмотрения заключался в том, что конечная скорость диффузионного транспорта предопределяет топологическую структуру многоклеточных животных. Показано, что многоклеточные могут быть жизнеспособными только потому, что их клетки сгруппированы вблизи трех развитых поверхностей с большой площадью, где происходит диффузионный обмен кислородом и питательными веществами из окружающей среды. У млекопитающих, например, такими поверхностями являются:

- ветвящиеся легкие,
- ветвящаяся система артериальных и венозных кровеносных сосудов,
- ворсинчатые стенки тонкого кишечника.

Диффузионная обусловленность клеточного обмена веществ порождает еще три обязательных свойства многоклеточных, неотделимых от их топологической структуры:

- наличие системы пищеварения – расщепления макроскопических фрагментов пищи до молекулярного уровня,

- сенсорная способность обнаружения макроскопических фрагментов пищи,
- способность к целенаправленным макроскопическим перемещениям, необходимым для приближения/удаления к обнаруживаемым фрагментам пищи.

Таким образом, *синхронная эволюция топологической структуры и способности к целенаправленной макроскопической подвижности многоклеточных является фундаментальным механизмом их существования* в условиях конечной скорости диффузионного транспорта молекул, необходимых для жизнеобеспечения клеток.

Способность к *макроскопическому целенаправленному движению* предполагает наличие уже у первых многоклеточных сенсорных систем для восприятия внешнего мира и согласованных когнитивных моделей внешнего мира и собственного тела, позволяющих управлять целенаправленным движением. *Это и есть возникновение первого наблюдателя на Земле, для которого наличие когнитивной способности является непреложным условием выживания.*

Таким образом, оценка времени возникновения первого наблюдателя на Земле, т. е. рекурсии, когда мир начинает отражаться в своей части, может быть сделана по палеонтологической датировке времени возникновения самых древних многоклеточных с надежными признаками способности к макроскопическому направленному движению (нижняя оценка) и по времени существования последнего общего предка животных, способных и неспособных к направленному макроскопическому движению (верхняя оценка).

Новые вопросы

Проведенное выше рассмотрение по самой своей постановке не предполагает ответа на вопрос о том, как именно сформировались первые многоклеточные, ограничиваясь предположением, что это произошло путем самоорганизации. В работе [5] старт развития многоклеточности связывается с тем, что у некоторых одноклеточных из-за генетических изменений полное разделение клеток при делении стало затрудненным. И такие события, по современным представлениям, в ходе эволюции происходили неоднократно. Однако представить, что переход от одноклеточных к многоклеточным произошел путем постепенного накопления малых изменений, довольно трудно, если они являются объемными, а не плоскими, т. е. имеющими толщину несколько клеток, какими были, по всей видимости, заднежутиковые,

и каковыми являются плоские черви¹. Безусловно, это трудный вопрос для современных эволюционных теорий.

В представляемой работе предлагается рассмотреть возможность самоорганизационного усложнения (эволюции) организмов многоклеточных.

Самоорганизационные механизмы, хорошо изученные в физике, обладают тем замечательным свойством, что качественные изменения состояния рассматриваемых систем происходят бифуркационным образом. Для того, чтобы самоорганизационные механизмы работали, необходимо выполнение следующих достаточно простых условий:

- рассматриваемая система должна быть открытой для поступления внешней энергии;
- она должна состоять из активных частиц, взаимодействующих друг с другом;
- при определенных параметрах система должна быть неустойчивой;
- в системе должны быть ограничители экспоненциального развития неустойчивости, для чего обычно достаточно финитности ее размера в том или ином смысле.

Удовлетворяет ли планета Земля этим условиям?

Формирование Земли как среды для жизни

Формирование Земли изучено и реконструировано весьма достоверно [6]. Отметим наиболее важные для рассмотрения моменты.

Вначале самоорганизационным образом из межзвездного газопылевого облака [7], сжавшегося под действием сил гравитационного притяжения, сформировалось Солнце ($\approx 2,0 \times 10^{30}$ кг). Высокое внутреннее давление в нем привело к возникновению реакции слияния протонов (ядер водорода) в ядра гелия, сопровождающейся излучением электромагнитных волн и корпускулярными выбросами, преимущественно состоящими из протонов. Последние 4,5 миллиарда лет Солнце с высокой точностью находится в стационарном состоянии, которое мало изменится и в следующий миллиард лет.

Однако $\approx 0,14\%$ материала не были поглощены молодым Солнцем. Из этого остатка, называемого протопланетным облаком [8], также самоорганизационным путем (аккреция), также под действием гравитационных сил взаимного притяжения образовались планеты Солнечной системы, включая Землю ($\approx 6,0 \times 10^{24}$ кг; $\approx 0,0003\%$ материала).

¹ Интересным объектом в этом смысле являются лиственные деревья. Они составляют значительную часть биомассы Земли и являются объемными организмами. Однако, в отличие от многоклеточных животных, они автотрофы, а их листья имеют толщину в несколько клеток, что оставляет диффузионный транспорт молекул эффективным. Таким образом, их выживание не требует способности к макроскопическому направленному движению, однако обменные системы с развитой площадью поверхности – листья и корни – у них имеются.

В процессе своего формирования Земля была чрезвычайно горячей из-за вулканических процессов и постоянного падения на нее других космических тел. С уверенностью можно сказать, что, когда материал протопланетного облака был исчерпан, прекратилась бомбардировка Земли космическими телами, и она начала остывать, образуя земную кору, а вследствие процесса дегазации и первичную атмосферу, планета была безжизненна². Поэтому представляется наиболее вероятным, что по достижении подходящих условий жизнь возникла спонтанно, самоорганизационным путем³ геохимической и химической эволюции. Но даже если предполагать, откладывая «на потом» вопрос о возникновении жизни, что она была занесена извне, единственным путем наблюдаемой ее эволюции может быть только самоорганизация. А вопрос о возникновении жизни просто откладывается.

Современные условия для жизни на Земле

Солнечная система автономна, как и планетные системы других звезд. Даже ближайšie к ней звезды и звездные системы находятся на таком огромном удалении, что не могут как-либо повлиять на нее. И даже допускаемое астрономами слияние нашей галактики «Млечный путь» с галактикой «Туманность Андромеды» [9] не повлияет на автономность звездных систем, включая Солнечную. Поэтому ее эволюция определяется исключительно ее внутренними закономерностями.

В свою очередь, если говорить о Земле, эволюция ее тела слабо и лишь опосредованно связана с активностью Солнца. Падающее на Землю солнечное излучение целиком возвращается в космос в виде инфракрасного (теплого) излучения.

Само же тело Земли меняется вследствие нагрева, возникающего при распаде ядер радиоактивных изотопов, в основном урана ^{238}U , ^{235}U , тория ^{232}Th , калия ^{40}K , имеющих длительный период полураспада. Эти тепловые процессы определяют такие значимые для биологической эволюции факторы, как вулканическая активность и движение материковых плит [6]. Темпы геологических изменений, связанных с этими процессами, измеряются миллионами лет⁴.

Тело Земли также эволюционирует в ходе геохимических реакций, частью которых являются биогеохимические реакции, ведущие к образованию почвы, без которой никакие многоклеточные организмы не могли бы существовать. Геохимические процессы изменяют молекулярный состав

² Т. е. величина биомассы была равна нулю.

³ Относительно появления на Земле воды как условия возникновения жизни ведется дискуссия. Есть предположение, что она была занесена космическими телами, но и химического состава тела Земли достаточно, чтобы вода возникла вследствие химической эволюции.

⁴ Например, если Африка и Южная Америка удалялись друг от друга с современной скоростью 2–4 см в год, то это заняло порядка 100 миллионов лет.

тела Земли и пространственное распределение атомов, но не изменяют ее атомный состав⁵.

Что же получилось?

Нынешняя жизнь существует на планете, масса которой составляет $\approx 6,0 \times 10^{24}$ кг. Общая масса живых организмов разными исследователями определяется и оценивается по-разному. Последняя по времени оценка [10], учитывающая только массу углерода, включенного в живую материю, составляет $\approx 5,5 \times 10^{14}$ кг. В школьном учебнике [11] биомасса Земли понимается как реальная масса живых организмов и оценивается в $\approx 2,4 \times 10^{15}$ кг. Таким образом, биомасса Земли меньше массы Земли на 9–10 порядков.

Столь малая величина означает, что биологическая эволюция затрагивает эволюцию тела Земли незначительно. Поэтому эволюция тела Земли, как уже сказано выше, является самостоятельным самоорганизационным процессом, динамика которого определяется связанными между собой тепловыми, седиментационными и геохимическими процессами.

Таким образом, мы пришли к очевидному факту, что жизнь сосредоточена в тонком приповерхностном слое Земли (компарimente) – практически полностью на суше и значительно меньше в океане. Если бы вовлеченный в жизнь углерод равномерно распределить по поверхности суши, то толщина получившегося слоя составила бы единицы миллиметров.

Физико-химические условия в этом компарimente определяются:

- электромагнитным и корпускулярным излучением Солнца, которое определяет такие биологически значимые приповерхностные явления, как погода и климат, а также энергетически обеспечивает фотосинтез,
- тепловыми процессами ядерного распада, порождающими значимую для атомного состава компаримента вулканическую активность и обуславливающими движение литосферных плит Земли,
- составом атмосферы, зависящим от процессов дегазации Земли и от геохимических, биогеохимических и биохимических процессов, в частности, фотосинтеза.

Условия эволюции

Вся известная многоступенчатая эволюция от образования Солнца до формирования на Земле компаримента, в котором возникла и эволюционирует жизнь, происходила спонтанным самоорганизационным образом. Нет никаких оснований считать, что эволюция жизни и ее форм происходит как-то иначе.

Как бы ни были сложны формы жизни, они характеризуются тем, что включены в компаримент, созданный самоорганизационной динамикой

компаримента (Солнце и Земля), с несопоставимо большими по количеству атомов и по использованной и используемой энергии. Однако эти процессы идут в гораздо более медленном темпе, чем динамические эволюционные процессы в компарimente жизни. Поэтому можно считать, что биологическая эволюция происходит в квазистационарных условиях взаимодействия со своими источниками энергии и атомов. Тогда на эволюцию влияют исключительно взаимодействия внутри компаримента.

Жизнь в компарimente подчиняется довольно сложно организованному пищевому циклу «продуценты – консументы – редуценты». Наибольшую часть биомассы представляют растения. Они являются продуцентами, производящими органические вещества путем фотосинтеза. Далее в цепи следуют гораздо меньшие по биомассе консументы разных порядков – от травоядных и всеядных до хищников. Они обеспечивают свои энергетические и пластические потребности благодаря поеданию растений и/или других животных. Далее идут редуценты – бактерии, грибы – и они разлагают во прах органические молекулы экскрементов и останков животных, впрочем, как и тел растений после их гибели⁶. Редуцированный материал затем вновь используется для рождения новых растений и животных.

Из сказанного следует, что на жизнь можно смотреть как на сложный самоподдерживающийся энергией Солнца цикл структурообразования и деструкции, с использованием ограниченного количества видов доступных атомов. Этот цикл реализуется с участием большого количества структур, называемых организмами, которые могут взаимодействовать в пищевом цикле. Таким образом, эволюцию видов можно рассматривать как смену участников структурообразования и деструкции в самоорганизационном цикле.

Не следует преувеличивать роль сложных организмов в этих процессах. Их роль незначительна в силу их малого количества. Так, например, биомасса всех животных составляет 0,36 % от всей биомассы Земли [10]. Вообще тенденция такова, что чем более сложен организм животного – участника процесса структурирования/деструкции, тем меньший объем имеет соответствующая ему биомасса. Исключением из этой монотонности по понятной причине является человек и разведенный им домашний скот.

Иногда стационарные условия резко изменяются. Это может быть вызвано как природными катастрофами, так и динамикой жизненного компаримента.

Так, например, экстремально высокая доля растений в биомассе – почти 80 %, скорее всего, является результатом их выхода на еще малоосво-

⁵ Падением метеоритов и ядерным распадом пренебрегаем.

⁶ Значительная часть растений, особенно в лесах, никем не поедается, а разлагается редуцентами после гибели растений и образует детрит, от которого начинается другая петля пищевого цикла. Для нашего рассмотрения это не принципиальная деталь.

енную сушу. Ни о каком конкурентном отборе речь не могла идти.

Также за последние 540 миллионов лет произошло пять глобальных катастроф, во время которых происходили массовые вымирания видов. В процессе восстановления им на смену на освободившиеся и новообразованные ниши приходили другие, приспособившиеся к ним виды.

Говорить о влиянии конкуренции на видообразование в данных случаях не приходится, тем более когда общие условия складываются огромным числом видов разного уровня сложности.

В этом смысле термин «конкуренция» оказывается весьма бессодержательным. Он скорее условно пригоден для описания взаимоисключения в простых лабораторных ситуациях, а не для реального видообразования в природе.

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

Литература

1. *Антонец В.А.* Пространственно-временные характеристики диффузии молекул предопределили топологическую организацию многоклеточных животных и возникновение у них познавательной способности // *Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях-2023: Труды VII Всероссийской конференции*. Н. Новгород : изд. Институт прикладной физики РАН, 2023. С. 7–9.
2. *Antonets V.A.* About the topological structure of multicellular animals // *Biophysical Reviews. The 7th Congress of Biophysicists of Russia - conference proceedings*, S4.231, <https://doi.org/10.1007/s12551-023-01150-w>.
3. *Antonets V.A.* On the estimation of the emergence of cognitive ability during biological evolution // *Biophysical Reviews. The 7th Congress of Biophysicists of Russia - conference proceedings*, S5.336, <https://doi.org/10.1007/s12551-023-01150-w>.
4. *Поннер К.Р.* Логика научного исследования. М. : Республика, 2004. 448 с.
5. *Basant A., Glotzer M.* Spatiotemporal Regulation of RhoA during Cytokinesis // *Curr. Biol.* 2018 May 7; 28(9): R570-R580. doi: 10.1016/j.cub.2018.03.045. PMID: 29738735 Free PMC article. Review.
6. *Ozima M., Korenaga J., Yin Qing-Zhu* The Earth: Its birth and growth. Second edition. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. DOI: 10.1017/CBO9780511980374.
7. *Лившиц М.А.* Солнце, URL: <https://www.astronet.ru/db/msg/aid/FK86/sun>, (дата обращения: 28.06.2025).
8. *Засов А.В.* Протопланетные диски URL: <https://www.astronet.ru/db/msg/1162367> (дата обращения: 28.06.2025).
9. *Cowen R.* Andromeda on collision course with the Milky Way // *Nature*. 2012. <https://doi.org/10.1038/nature.2012.10765>.
10. *Bar-On Y.M., Phillips R., Milo R.* The biomass distribution on Earth // *PNAS*, 2018. V. 115, no. 25. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.
11. *Лисов Н.Д., Камлюк Л.В., Лемеза Н.А. и др.* Общая биология: Учебное пособие для 11-го класса 11-летней общеобразовательной школы, для базового и повышенного уровней / Под ред. Н.Д. Лисова. Минск : Беларусь, 2002. 279 с.

Исследование влияния музыкальных предпочтений на когнитивные процессы

Д.В. Белощенко, Т.В. Гавриленко, Р.А. Чирко

Сургутский государственный университет;
d.beloshhenko@mail.ru

Современные исследования в области нейропсихологии и когнитивной науки свидетельствуют о том, что музыка способна модулировать мозговую активность, влияя на когнитивные функции [1, 4, 5–7]. Когнитивные процессы, такие как внимание, память, мышление и восприятие, являются основой интеллектуальной деятельности человека. Понимание того, как различные музыкальные стимулы воздействуют на эти процессы, имеет большое значение для повышения эффективности обучения, труда и общего качества жизни.

Особый интерес представляет вопрос о том, насколько индивидуальные музыкальные предпочтения влияют на работу мозга. Любимая музыка может вызывать положительные эмоции, улучшать настроение и способствовать повышению концентрации. С другой стороны, музыка, которая человеку не нравится, может отвлекать и снижать продуктивность [3, 7–9]. Изучение этого феномена позволяет разобраться в механизмах взаимодействия между эмоциональным и когнитивным компонентами восприятия музыки.

В данной работе представлены результаты исследования влияния музыкальных предпочтений на выполнение когнитивных задач, таких как письмо, а также на физиологические показатели человека: SpO_2 – уровень кислорода в крови и PR – частоту пульса.

В исследовании участвовали 15 молодых женщин в возрасте 21 года. Все испытуемые были правшами, не имели хронических заболеваний и вредных привычек.

Для анализа изменений в когнитивных функциях (точности выполнения задачи) и параметрах сердечно-сосудистой системы (ССС) в зависимости от характера прослушиваемой музыки или звукового фона участницам эксперимента предлагалось переписать специализированный текст (объемом 3000 символов) в двух условиях: без акустического воздействия и при прослушивании музыкальных композиций. Параллельно на указательный палец левой руки каждой участницы крепился напульсцевой пульсоксиметр HealthTree JKS50B, который регистрировал показатели SpO_2 и PR.

Эксперимент состоял из 5 этапов по 3 минуты, между каждым из которых испытуемым предоставлялось время для восстановления (15 мин.). На первом этапе переписывание текста в спокойной обстановке (в покое). На втором – при прослушивании «белого шума» (БШ), на третьем – при прослушивании ритмичной музыки (PM), на четвертом – классической музыки (произведения Люд-

вига ван Бетховена) – КМ, на пятом – тяжелой металлической музыки (индастриал-металл, группа Rammstein) – ИМ. При этом фиксировались количество написанных слов и число допущенных грамматических ошибок (всего было собрано 75 работ).

На рис. 1 показана динамика поведения значений количества написанных слов в группе молодых женщин в разных состояниях. Было установлено, что максимальное (*Max*) количество слов написано при прослушивании классической музыки – 61, а минимальное (*Min*) при прослушивании ритмичной музыки – 18.

В спокойном состоянии испытуемые написали 477 слов, X_{cp} – 32; при прослушивании «белого шума» 511 слов, X_{cp} – 34; при прослушивании Rammstein – 594 слова, X_{cp} – 39; при прослушивании классической музыки – 667 слов, X_{cp} – 44; при прослушивании ритмичной музыки – 601 слово, X_{cp} – 40.

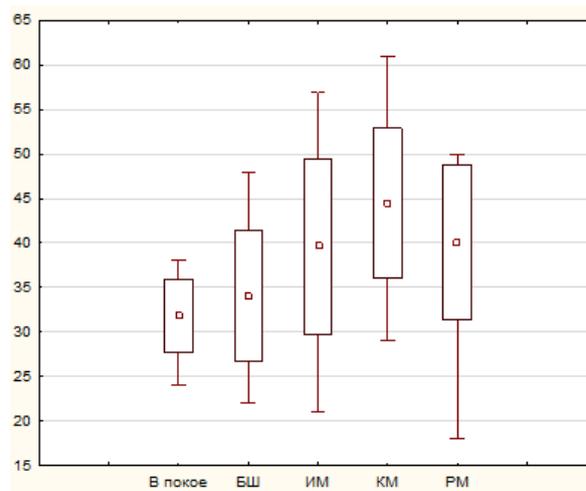


Рис. 1. Количество написанных слов в группе испытуемых ($n = 15$ человек) в спокойном состоянии и во время прослушивания музыкальных композиций: \square Mean – среднее количество написанных слов; \square Mean \pm SD – стандартное отклонение выборки; I Min-Max – минимальное и максимальное количество написанных слов

В среднем больше всего слов (рис. 1) и общее количество слов также было написано при прослушивании классической музыки, которая может способствовать улучшению памяти и ускорению обработки информации, что, в свою очередь, приводит к увеличению количества написанных слов в результате более эффективной работы мозга [2, 3, 7].

Интересен тот факт, что 75 % женщин предпочитают слушать классическую музыку и многим, как оказалось, очень нравится «Лунная соната» Людвига ван Бетховена. Прослушивание предпочитаемой музыки могло повысить уровень вовлеченности в задачу, позволяя человеку глубже погрузиться в работу и максимально повысить продуктивность.

Аналогичная ситуация наблюдалась и при анализе количества допущенных ошибок. При прослушивании классической музыки количество ошибок (рис. 2) совершили 3 человека из 15, общее количество ошибок во всей группе было 5 (самое маленькое).

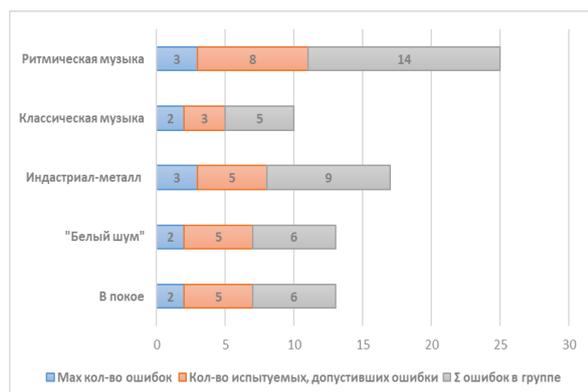


Рис. 2. Количество допущенных ошибок в группе испытуемых ($n = 15$ человек)

Анализ рис. 2 показал, что в группе в спокойном состоянии и при прослушивании «белого шума» 5 человек совершили 6 ошибок, при прослушивании индастриал-металл 5 человек совершили 9 ошибок, при прослушивании классической музыки – 3 человека совершили 5 ошибок и при прослушивании ритмичной музыки 8 человек совершили 14 ошибок.

В целом количество ошибок (при написании текста) у каждой испытуемой при прослушивании различных музыкальных композиций и в спокойном состоянии варьировало от 0 (*Min*) до 3 (*Max*).

25–53 % испытуемых совершили ошибки при написании одного и того же текста в разных состояниях. Больше всего ошибок установлено при прослушивании ритмичной музыки – 14, что может быть связано с ярко выраженным темпом и ритмом музыки, который отвлекает внимание и снижает точность при выполнении полученного задания, требующего высокой точности и внимательности [1, 2, 6].

Далее был выполнен анализ показателей ССС молодых женщин. Было установлено, что на всех этапах эксперимента SpO_2 составляло 89–98 %, что в принципе является нормой сатурации для здорового человека. Анализ значений PR представлен на рис. 3.

Было установлено (рис. 3), что в группе женщин в среднем PR составляет в спокойном состоянии – 81 уд./мин., при прослушивании «белого шума» 84 уд./мин., при прослушивании

Rammstein – 91 уд./мин., при прослушивании классической музыки – 78 уд./мин. и при прослушивании ритмичной музыки 88 уд./мин. Минимальное значение PR было установлено при прослушивании Людвига ван Бетховена – 62 уд./мин, *Max* – 97 уд./мин при прослушивании индастриал-металл.

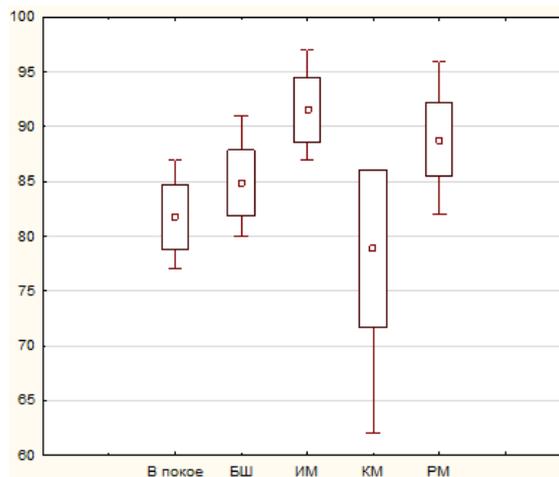


Рис. 3. Результаты PR в группе испытуемых ($n = 15$ человек) без акустического воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций. □ *Mean* – среднее значение PR; □ *Mean*±*SD* – стандартное отклонение выборки; I *Min-Max* – минимальное и максимальное значение PR

В целом, у женщин (рис. 3) наблюдается увеличение PR при прослушивании «белого шума» на 2–6 уд./мин, Rammstein на 5–13 уд./мин, ритмичной музыки на 4–11 уд./мин. Тяжелый металл и ритмичная музыка могут стимулировать физиологические процессы в организме и вызывать увеличение PR.

Сердце может непроизвольно пытаться синхронизироваться с внешним ритмом музыки, что приводит к увеличению пульса, связанному с сильной эмоциональной и физиологической реакцией организма [2, 8].

Отметим, что у испытуемых, которые предпочитают слушать классическую музыку, у 75 % женщин PR становилась ниже на 3–12 уд./мин либо не изменялось. Классическая музыка с медленным темпом и мягкой мелодией способна снижать частоту сердечных сокращений, что связано с активацией парасимпатической нервной системы, которая отвечает за расслабление и восстановление организма [2, 3, 5].

Далее была выполнена статистическая обработка полученных данных.

Полученные значения количества написанных слов и PR в группе молодых женщин проверялись на соответствие закону нормального распределения с помощью теста Колмогорова – Смирнова и Лиллифорса, Шапиро – Уилка. Данные имеют нормальный тип распределения ($p > 0,05$), поэтому дальнейшие сравнения производили с помощью парного критерия Стьюдента (табл. 1–2).

Таблица 1

Результаты применения парного критерия Стьюдента (t -тест для зависимых выборок) для оценки наличия различий в количестве написанных слов в группе испытуемых без акустического воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций

n = 15	X_{cp}	Std.Dv.	Diff.	Std.Dv. diff.	t	p
CC	31,8	4,14				
БШ	34,1	7,31	-2,3	5,77	-1,5	0,15
ТМ	39,6	9,85	-7,8	7,11	-4,2	0,00
КМ	44,5	8,45	-12,6	7,01	-6,9	0,00
РМ	40	8,72	-8,26	6,59	-4,85	0,00

Анализ табл. 1 показал, что значимыми были различия полученные при сравнении количества написанных слов в спокойном состоянии с тяжелым металлом, с классической музыкой и ритмичной музыкой везде $p = 0,000$. Похожая картина наблюдалась и при сравнении значений PR в группе испытуемых (табл. 2).

Таблица 2

Результаты применения парного критерия Стьюдента (t -тест для зависимых выборок) для оценки наличия различий в PR в группе испытуемых без акустического воздействия и во время прослушивания музыкальных композиций

n = 15	X_{cp}	Std.Dv.	Diff.	Std.Dv. diff.	t	p
CC	81,8	2,95				
БШ	84,8	3,02	-3,1	2,12	-5,6	0,00
ТМ	91,5	2,89	-9,7	2,76	-13,6	0,00
КМ	78,8	7,23	2,9	6,99	-1,62	0,12
РМ	88,8	3,36	-7	3,42	-7,9	0,00

Анализ табл. 2 показал, что значимыми были различия, полученные при сравнении значений частоты пульса в спокойном состоянии и при прослушивании «белого шума», тяжелого металла и ритмичной музыки, везде $p = 0,000$.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что различные музыкальные композиции существенно влияют на когнитивные функции (письмо, память) и физиологические показатели человека (SpO_2 и PR), а также производительность труда при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности.

Женщины, являющиеся поклонницами классической музыки, написали больше всего слов, вероятно, благодаря сочетанию улучшенной концентрации, позитивного эмоционального состояния и стимулирования когнитивных функций.

Классическая музыка создает благоприятную атмосферу для выполнения задач, требующих внимания и сосредоточенности, что приводит к повышению продуктивности и эффективности работы [3, 9].

Индивидуальные предпочтения играют важную роль в том, как музыка влияет на человека, и в данном случае любимые классические композиции способствовали достижению наилучших результатов в письменной деятельности.

Литература

1. Бехтерева А.И. Влияние музыки на человека // Избранные доклады 61-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Томск : Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2015. С. 893–896.
2. Киреева Л.А. и др. Влияние прослушивания музыки Моцарта и рок-музыки на умственную работоспособность у студентов с различными типами высшей нервной деятельности / Л.А. Киреева, В.Н. Яковлев, Е.В. Дорохов, А.В. Сергиенко, А.В. Карпова, Е.Ю. Анциферова // Прикладные информационные аспекты медицины. 2015. Т. 18, № 1. С. 102–105.
3. Матюхина А.А. Исследование влияния классической музыки на функциональное состояние людей различных профессий // Электронный научно-познавательный журнал ВГСПУ «Грани познания». 2013. № 2 (22). С. 69–72.
4. Петрушин В.И. Возможности музыкально-интегральной психотерапии в профилактике городских неврозов // Вестник МГУКИ. 2016. № 4 (72). С. 124–131.
5. Самсонова Г.О. Системные психофизиологические механизмы афферентно-эфферентного воздействия музыки: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Тула, 2002. 24 с.
6. Федотчев А.И., Радченко Г.С. Музыкальная терапия и «музыка мозга»: состояние, проблемы и перспективы исследований // Успехи физиологических наук. 2013. Т. 44, № 4. С. 35–50.
7. Фролкин В.А. Модели мозга, разработанные в музыкальной психологии // Художественное образование и наука. 2014. № 1. С. 116–123.
8. Хайт Г.А. Музыка и здоровье // Медицинские, социальные и философские аспекты здоровья человека в современном обществе: опыт междисциплинарных исследований: коллективная монография. Орёл: Изд-во Орловского гос. университета им. И.С. Тургенева, 2015. С. 143–148.
9. Хруц О.И., Саранская Н.В. Методы регуляции эмоционального состояния // Амурский научный вестник. 2013. № 3. С. 190–196.

Частотно-зависимые свойства нелинейных процессов человека и морской свинки при фотостимуляции

А.Т. Бондарь¹, Л.В. Шубина², С.Б. Танасова¹

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

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

Одной из центральных проблем современной науки является расшифровка закономерностей проявления электрических реакций мозга на внешние сигналы в различных условиях его функционирования. Как показано нами ранее, в условиях фотостимуляции такая реакция является крайне нелинейной, что проявляется в виде появления в спектре ЭЭГ гармонически связанных с частотой стимуляции компонент, не присутствующих в стимуле. Эти компоненты не являются в строгом смысле гармониками, а представляют собой независимые процессы с собственной динамикой и локализацией [1]. Такие гармонически связанные процессы требуют выделения в особый класс, и в дальнейшем мы будем называть их псевдогармониками. Независимая динамика гармонических компонент вызванных колебаний, выявленная в нашей работе, свидетельствует, что нелинейность является скорее активным функциональным процессом, чем отражение простого искажения сигнала. В отличие от электронных систем, где THD имеет постоянное значение, в нервной системе он представляет колебательный процесс, достигая на определенных интервалах времени сотен процентов [1].

В последние годы фотостимуляция приобретает все большее значение как в диагностических, так и терапевтических целях для модификации неблагоприятных отклонений ЭЭГ от нормы, а также при разработке ВСИ [2].

В связи с этим представляет большой интерес исследование частотной зависимости нелинейных свойств реакций мозга, а также их видовая специфичность. Для исследования этой зависимости эксперименты проводились по одной и той же методике как на людях, так и на морских свинках.

Методика

Фотостимуляция осуществлялась через красные светодиоды, встроенные в очки, в случае экспериментов на людях (рис. 1, Б), или в пенал, в котором располагались животные (рис. 1, В). Стимул ступенчато изменялся от 2 до 24 Гц с шагом 0,2 Гц и длительностью шага 3 с (рис. 1, А). Регистрацию ЭЭГ человека проводили в 19 отведениях, расположенных по системе 10–20. Регистрация локальных полевых потенциалов у морских свинок осуществлялась одновременно из четырех структур мозга: медиальной септальной области, гиппокампа, энториальной коры и амигдалы.

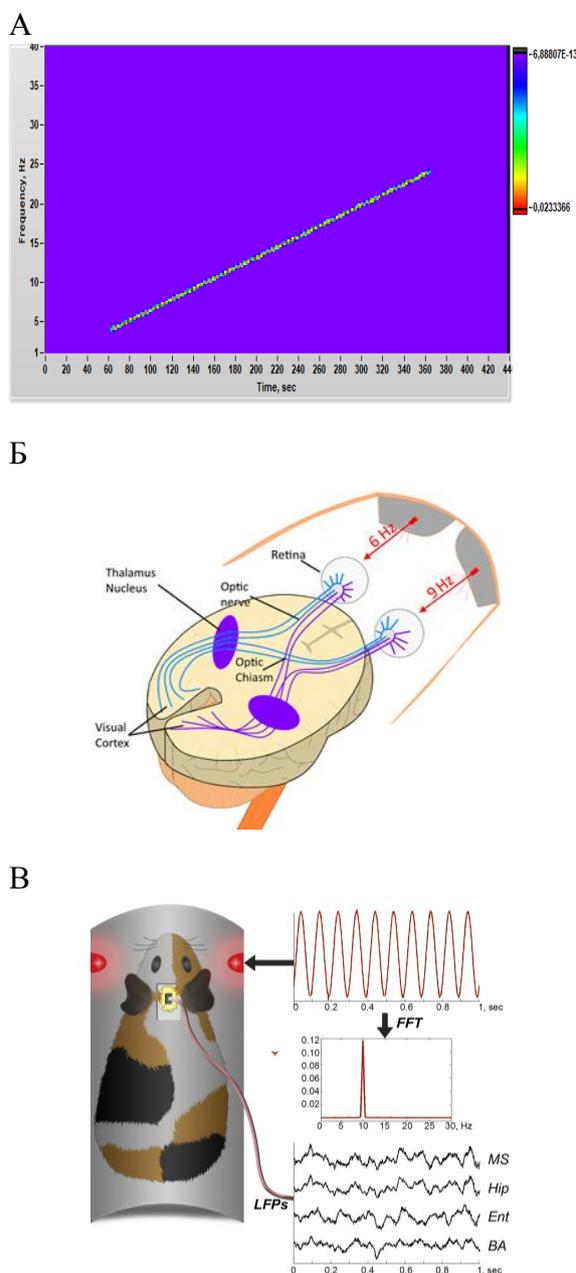


Рис. 1. Динамика частоты стимула в процессе стимуляции (А) человека (Б) и морской свинки (В)

Анализ результатов осуществлялся с применением динамического спектрального анализа (БПФ).

Для оценки нелинейных ответов использовался коэффициент нелинейных искажений, вычисляемый по формуле

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \times 100 \%,$$

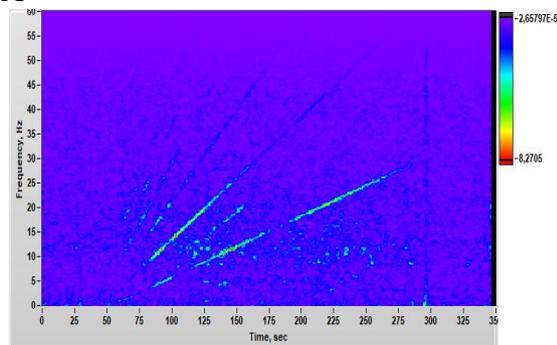
где $U_1 - U_n$ – амплитуды гармонических компонент. Зависимость ТНД от частоты стимуляции будем называть «нелинейным портретом», а зависимости амплитуд гармонических компонент – «резонансным портретом».

Для межвидового сравнения будем рассматривать доминирующие в электрической активности диапазоны у каждого вида: дельта – у морской свинки и альфа – у человека.

Полученные результаты и обсуждение

Как видно из рис. 2, реакция электрической активности в ответ на изменяющуюся по частоте стимуляцию носит полигармонический характер, образуя своеобразный веер гармонически связанных компонент как в коре человека (отведение FZ), так и в 4 исследованных структурах мозга морской свинки.

А



Б

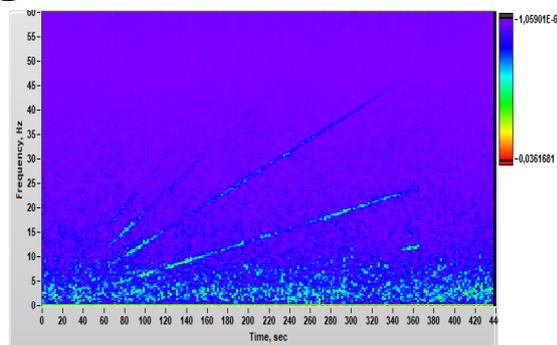


Рис. 2. А – динамика спектра ЭЭГ (отведение FZ) испытуемого Ф. при переменной стимуляции от 2 до 24 Гц. Б – динамика спектра ЛПП при стимуляции от 1 до 24 Гц

Несмотря на то что в покое спектры ЭЭГ и ЛПП имеют значительное различие, вызванная активность имеет много общего во всем исследованном частотном диапазоне. Слабо выраженные в спектр ЛПП частоты свыше 3 Гц, тем не менее, демонстрируют значительные резонансные свойства, мало отличимые от таковых у человека. Этот факт свидетельствует о наличии в исследованных структурах нейросетей, обладающих соответствующими амплитудно-частотными характеристиками, функциональная роль которых требует дальнейших исследований.

На рис. 3 представлены зависимости ТНД от частоты стимуляции. Можно видеть, что в преде-

лах альфа-диапазона в ЭЭГ человека выделяется участок в интервале 10–11 Гц, характеризующийся относительно низкими значениями ТНД. Данную зону условно будем обозначать как линейную, поскольку ТНД в ней значительно ниже соседних зон спектра вследствие доминирования в ответе первой псевдогармоники. Напротив, в диапазоне 7–9 Гц наблюдается увеличение вклада второй и третьей псевдогармоник, что приводит к значительному увеличению ТНД. Этот частотный диапазон будем считать нелинейным.

Аналогичная зависимость свойственна и для морской свинки. Диапазон частот, соответствующий доминирующей частоте в спектре ЛПП, равный 1,8–2 Гц, представляет собой относительно линейную зону, в то время как его окрестности – нелинейную. Линейные зоны совпадают с центрами локализации доминирующих традиционных ритмов электрической активности, в то время как нелинейные зоны расположены по их краям.

Разделение спектра на линейные и нелинейные зоны является условным, поскольку и в той и в другой образуется система псевдогармоник. Различие заключается в том, что в линейной зоне доминирует 1-я псевдогармоника, а в нелинейной – 2-я и последующие, что и определяет различие в ТНД.

Множество нейросетей представляют собой колебательные контуры, каждый из которых имеет свою собственную частоту. Согласно литературным данным, собственная частота определяется размерами нейросетей, т. е. наблюдаются обратные соотношения между размером сети и частотой [3].

Совпадение этих собственных частот с частотой стимуляции или кратными ей, например гармониками, может приводить к возбуждению соответствующих нейросетей, что и приведет к образованию множества псевдогармоник. Как известно из литературных данных, нелинейные искажения гармонических стимулирующих сигналов происходит уже на уровне сетчатки [4]. В коре, а возможно, и в нижележащих структурах зрительной системы происходит дифференциация гармоник этого искаженного сигнала по соответствующим нейросетям, превращая их в псевдогармоники. Анализ фазовых соотношений стимула и гармоник, а также динамик их амплитуд в гиппокампе, сеπτуме, амигдале и энториальной коре свидетельствует, что уже в ряде подкорковых структур вызванные кратные частоте стимуляции компоненты уже не являются в строгом смысле гармониками [1], а представляют собой независимые процессы, локализованные в разных нейросетях. Эти нейросети связаны с множеством других нейросетей системой прямых и обратных связей, которые могут играть роль своеобразных фильтров. Эти фильтры также могут играть роль как положительных, так и отрицательных обратных связей, изменяя резонансные свойства нейросети.

Нейросети, формирующие активность в линейной области спектра, возможно, обладают способностью при их внешней активации затормаживать исходящие прямые связи, не пропускавая гармонические компоненты высоких порядков.

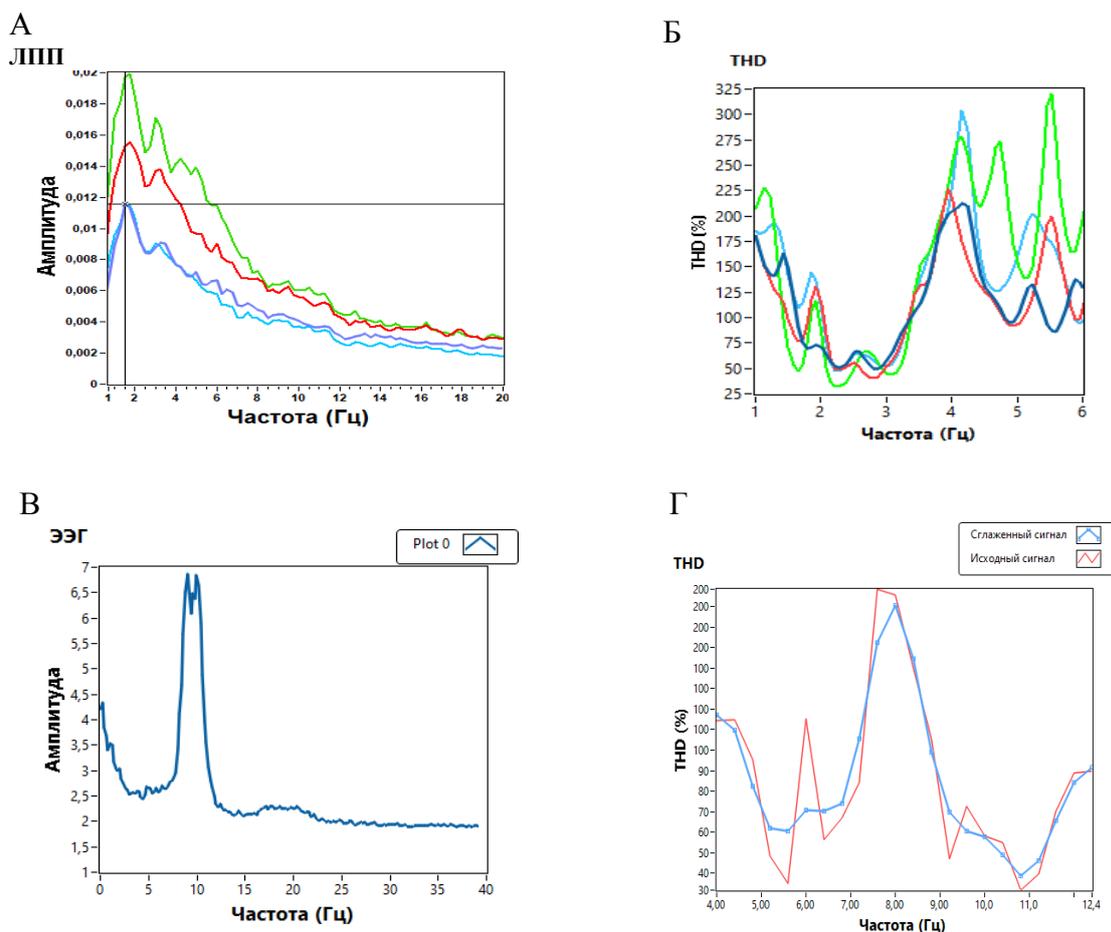


Рис. 3. А – спектры ЛПП в фоне морской свинки в септуме, гиппокампе, энториальной коре и амигдале. Б – зависимость THD от частоты стимуляции в зарегистрированных структурах. В – спектр ЭЭГ (отведение FZ) в фоне. Г – зависимость THD от частоты стимуляции в ЭЭГ человека (отведение FZ)

Нейросети, обладающие собственными частотами в нелинейной области спектра, напротив, пропускают всю исходящую гармонически связанную активность, формируя систему псевдогармоник.

Литература

1. Bondar A. and Shubina L. Nonlinear reactions of limbic structure electrical activity in response to rhythmical photostimulation in guinea pigs // Brain Research Bulletin. 143 (2018), 73–82.

2. Yangsong Zhang, Daqing Guo, Peng Xu, Yu Zhang, Dezhong Yao. Robust frequency recognition for SSVEP-based BCI with temporally local multivariate synchronization index // Cogn. Neurodyn. 2016. DOI 10.1007/s11571-016-9398-9.

3. Buzsáki G., Draguhn A. Neuronal oscillations in cortical networks // Science. 2004. 304: 1926–1929.

4. Chang Y., Burns S.A., Kreitz M.R. Red-green flicker photometry and nonlinearities in the flicker electroretinogram // J. Opt. Soc. Am. 1993. A 10, 1413–1422. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.10.001413>.

On-line измерения в модальном пространстве

М.Б. Бохонко¹, В.А. Антонец^{2,3}

¹Московский физико-технический институт;
bokhonko.ma@phystech.edu

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

³Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
antonetsva@gmail.com

В докладе описывается разработанное программное приложение, предназначенное для измерения количественных характеристик перцепции стимулов различной модальности в реальном масштабе времени.

Приложение реализует принцип, изложенный в работах [1–3]. Он состоит в том, что в зависимости от поставленной задачи испытуемый управляет параметрами зрительных (цвет, геометрическая форма, размер) или звуковых (высота тона, громкость) стимулов, генерируемых компьютером.

Обычно задача состоит в том, чтобы воспроизвести требуемые параметры стимула, являющегося виртуальным объектом. Например, это может быть задача по выравниванию цвета управляемого стимула с образцом, или задача по выравниванию размеров объекта, или задача по установлению отрезка параллельно образцовому.

Так как все параметры стимула, генерируемого компьютером, регистрировались, то по результатам теста можно было количественно измерить статическую и динамическую погрешность его выполнения.

В упомянутых работах [1–3] управление осуществлялось с помощью специального бесконтактного манипулятора, а дизайн эксперимента был таким, что с высокой гарантией были исключены всякого рода «подсказки». Поэтому испытуемый мог осуществлять управление параметрами стимулов, ориентируясь только на свое зрительное и слуховое восприятие. Таким образом, измеренные статические и динамические погрешности оказываются количественными характеристиками перцепции.

Важным недостатком предыдущих реализаций метода, названного *Hand tracker*, было то, что бесконтактный (ультразвуковой) манипулятор сам по себе был довольно сложным и дорогим устройством – частью программно-аппаратного комплекса. Так как промышленный выпуск такого устройства был совершенно нерентабельным, фактически этим методом могли пользоваться только его разработчики.

Разработанное приложение полностью устраняет прежние аппаратные ограничения и делает метод доступным широкому кругу исследователей

и практиков. Теперь для проведения эксперимента требуется только ноутбук с веб-камерой, которая вместо ранее использовавшегося манипулятора отслеживает движение руки испытуемого в ходе решения тестовой задачи по управлению параметрами стимула. Чтобы отслеживание движений руки было точным и устойчивым, испытуемый удерживает в руке маркерный объект. Например, это может быть шарик для пинг-понга, кружок на экране смартфона или иной удобный предмет.

Для проведения исследования пользователь по индивидуальной ссылке заходит на сайт, вводит необходимые ему данные и, следуя инструкциям на экране, перемещает объект с маркером в поле зрения камеры, чтобы управлять параметрами стимула.

Приложение отслеживает в реальном времени, преобразует перемещение маркерного объекта в сигнал управления визуальным стимулом на экране, например, настраивает параметры цвета, формы и др.

Все движения маркера фиксируются, и по завершении теста система сохраняет последовательность координат и параметры взаимодействия в базе данных для последующего анализа.

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

Литература

1. Антонец В.А., Ковалёва Э.П., Зевеке А.В. и др. Новые человеко-машинные интерфейсы. В кн.: Нелинейные волны. Синхронизация и структуры. Ч. 2. Под ред. Рабиновича М.И., Сушика М.М., Шалфеева В.Д. Н. Новгород : Издательство Нижегородского государственного университета, 1995. С. 87–98.

2. Antonets V.A., Kazakov V.V., Anishkina N.M. Quantitative evaluation of tonal sound frequency perception by a man. *Biophysics* 2010; 55(1): 104–109, <https://doi.org/10.1134/s0006350910010173>.

3. Антонец В.А. Измерение количественных характеристик перцепции с использованием моторного человеко-компьютерного интерфейса *Hand tracker* // Современные технологии в медицине. 2019. Т. 11, № 1. С. 141–149. <http://dx.doi.org/10.17691/stm2019.11.1.16>.

Особенности вегетативной регуляции детей из семей с разными типами наказания и поощрения

С.А. Буркова

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург;
burkovasa@herzen.spb.ru

Здоровье человека определяется уровнем физического, психического и социального благополучия, а также способностью адаптироваться к окружающей среде. Вегетативная нервная система (ВНС) играет важную роль в поддержании этого баланса, обеспечивая адаптацию через взаимодействие симпатической и парасимпатической систем. Оценка вариабельности сердечного ритма (ВСР) служит важным инструментом для определения адаптационных возможностей, поскольку сердечно-сосудистая система быстро реагирует на стрессовые воздействия [6].

Вегетативная регуляция обеспечивает приспособительные реакции (адаптацию) энергетически, а эмоции играют важную роль в динамике этой деятельности: длительные отрицательные эмоции способствуют нарушениям приспособительного поведения, вплоть до его остановки [6].

В последние годы отмечается рост числа детей с социально-эмоциональными нарушениями. Предполагается, что дисбаланс вегетативной регуляции и нейровисцеральная дезинтеграция могут способствовать развитию таких расстройств. В качестве биомаркеров используют спектральный анализ ритмов сердца (САРС), который позволяет за короткое время оценить тонус симпатической и парасимпатической систем без инвазивных методов [3].

Воспитание, включающее дисциплину через поощрения и наказания, является важной составляющей формирования личности ребенка. К началу 19 века система поощрений и наказаний приобрела гуманистическую направленность, вопрос применения данных методов постоянно обсуждается, однако отсутствуют данные о реальной ситуации в семьях [7].

Воспитательные системы, основанные на поощрениях и наказаниях, формируют ценностные ориентации ребенка через эмоционально насыщенные ситуации. Нарушения в системе воспитания могут приводить к дисгармонии в эмоциональном развитии и снижению психофизиологических ресурсов ребенка [1].

Эмоциональные переживания вызывают изменения различной глубины в деятельности нервной системы, сердца, дыхания, желез внутренней секреции, мышечной системы и т. д. Но именно сердце максимально тонко и оперативно реагирует на такие воздействия. Исследования современных авторов показывают, что при психогенных расстройствах могут возникать нарушения в деятельности сердца, достигающие до патологических состояний. Показано, что при психогенных расстройствах наблюдается нарушение сердечной

деятельности вплоть до патологических состояний [4].

Разработанный еще в 70-х годах спектральный анализ ритма сердца позволяет эффективно характеризовать активацию симпатической или парасимпатической систем ВНС, что связано с когнитивной оценкой ситуации и центральной регуляцией. Этот метод расширяет возможности объективной оценки эмоциональных переживаний и уровня стрессоустойчивости у детей, а также прогнозировать реактивность ВНС [5]. Исследования ВСР приобретает особое значение для исследования детей разных возрастных и социальных групп и пола, а также детей с различными проявлениями психических свойств и состояний [2].

Целью данного исследования стало изучение характеристик кардиоинтервалов детей в процессе припоминания наказания и поощрения.

Когда мы говорим о первоклассниках, то отмечаем, что особенности данного возраста (6–8 лет) проявляются в прогрессивных изменениях во всех сферах, начиная от совершенствования психофизиологических функций и заканчивая возникновением сложных личностных новообразований.

На основе вышесказанного был разработан следующий *дизайн исследования*:

Экспериментальную выборку составили 119 первоклассников (6–8 лет) двух школ различных районов города Санкт-Петербурга.

Методы, использованные в исследовании:

- анализ вариабельности сердечного ритма ребенка (программно-аппаратный комплекс «Омега-М»);
- вопросник «Осознанность использования системы поощрения и наказания в семье» (Николаева, 2002) [8].

Полученные в ходе исследования данные обрабатывались с помощью следующих статистических методов обработки данных: корреляционный анализ r-Спирмена; факторный анализ; дисперсионный анализ (ANOVA) с разным количеством факторов; непараметрический критерий Колмогорова – Смирнова для одной выборки.

Ход исследования

В исследовании с помощью программно-аппаратного комплекса «Омега-М» (анализ основан на информационной технологии анализа биоритмологических процессов – «фрактальная нейродинамика») трижды происходила последовательная запись 300 RR-интервалов: первая записывала состояние в фоне, далее две записи с отслеживанием реакции на вопросы опросника о

наказании и поощрении (часть детей сначала отвечала на вопросы о наказании, а затем о поощрении, а другая – в обратной последовательности), при параллельной фиксации ответов детей в протоколе.

При анализе ответов на вопросы опросника были получены следующие данные. Методы наказания, упоминаемые детьми, можно классифицировать следующим образом: вербальное (79 %), лишение удовольствия (12 %) и физическое наказание (9 %). Данные показывают, что около 40 % детей испытывают чувства, свидетельствующие о неэффективности применяемых методов наказания. Методы поощрения, упоминаемые детьми, включают вербальное поощрение (60 %), разрешение на определенные действия (18 %), тактильное (13 %) и материальное (7 %). 2 % детей утверждают, что их не поощряют, а 24 % испытывают чувства, указывающие на нарушения в системе наказания и поощрения в семье.

В ходе проведенного дисперсионного однофакторного анализа было установлено, что независимая переменная «пол» не оказывает значительного влияния на зависимые переменные, такие как «спектральные показатели сердечного ритма» и «показатели активности сердца по Баевскому».

Анализ воздействия эмоциональных переживаний ребенка, связанных с воспоминаниями о поощрении и наказании в семье, выявил следующие закономерности. Переживания, связанные с системой наказания в семье, практически не коррелируют с характеристиками кардиоинтервалов. В то же время наблюдается значительное влияние независимой переменной «вид поощрения» на зависимые переменные, характеризующие кардиоинтервалы (см. табл. 1).

Таблица 1

Результаты дисперсионного анализа, показывающие влияние независимой переменной «вид поощрения» на зависимые переменные: вариабельности кардиоритма при припоминании и вербальном воспроизведении поощрения

Зависимые переменные	F	P	Направление действия фактора
1. Амплитуда моды R-R интервалов	5,076	0,001	Амплитуда уменьшается, если ребенка поощряют тактильно
2. Мода R-R интервалов	3,594	0,01	Чем выше мода, тем более вероятно, что ребенка поощряют тактильно
3. Среднее квадратичное отклонение величины R-R интервалов	2,840	0,05	Отклонение увеличивается, если ребенка поощряют тактильно

Результаты исследования показали, что система поощрения, применяемая в семье, оказывает заметное влияние на характеристики кардиоин-

тервалов детей даже в контексте наказания (см. табл. 2). Дисперсионный однофакторный анализ выявил влияние независимой переменной «вид поощрения» на зависимые переменные, характеризующие кардиоинтервалы.

Таблица 2

Результаты дисперсионного анализа, показывающие влияние независимой переменной «вид поощрения» на зависимые переменные: вариабельности кардиоритма при припоминании и вербальном воспроизведении наказания

Зависимые переменные	F	P	Направление действия фактора
1. Вариационный размах кардиоинтервалов	3,469	0,01	Вариационный размах уменьшается, если ребенка поощряют тактильно
2. Среднее квадратичное отклонение величины R-R интервалов	3,292	0,01	Отклонение уменьшается, если ребенка поощряют тактильно
3. Амплитуда моды кардиоинтервалов	3,170	0,01	Показатель растет, если ребенка поощряют тактильно
4. Стандартное отклонение величины кардиоинтервалов	3,111	0,01	Показатель уменьшается, если ребенка поощряют тактильно
5. Волны высокой частоты	2,580	0,05	Показатель уменьшается, если ребенка поощряют тактильно
6. Мода кардиоинтервалов	2,445	0,05	Показатель уменьшается, если ребенка поощряют тактильно

В частности, данные свидетельствуют о том, что максимальные вариации кардиоинтервалов наблюдаются при тактильном поощрении, в то время как минимальные вариации фиксируются при отсутствии ответа. В условиях наказания наблюдается обратная тенденция: тактильное поощрение приводит к более выраженным симпатическим влияниям на синусовый узел сердца. Таким образом, близость ребенка к родителю во время поощрения усиливает болезненные переживания при наказании. В случае, когда ребенок сообщает о нехватке поощрения, наблюдаются более выраженные симпатические влияния при поощрении и парасимпатические – при наказании.

Также было установлено влияние независимой переменной «переживания при поощрении» на зависимые переменные, характеризующие кардиоинтервалы. При воспоминании о наказании вариационный размах составил $F = 2,473$, $p > 0,05$, что указывает на симпатические влияния, в то время как при воспоминании о поощрении волны высокой частоты составили $F = 2,637$, $p = 0,05$, что указывает на парасимпатические влияния. В данном контексте, чем больше положительных переживаний испытывает ребенок, тем более выраженными становятся симпатические влияния при наказании и парасимпатические – при поощрении.

Таким образом, система поощрения демонстрирует значительное влияние на характеристики

кардиоинтервалов как в контексте воспоминаний о наказании, так и о поощрении. Исследование подтвердило, что именно система поощрения оказывает воздействие на данные характеристики. В ситуациях, когда ребенок говорит о тактильном контакте в контексте поощрения, наблюдается снижение variability кардиоинтервалов при воспоминании о наказании и увеличение variability при воспоминании о поощрении. Напротив, если ребенок заявляет о недостатке похвалы, фиксируется обратная динамика изменений variability кардиоинтервалов в условиях поощрения и наказания.

Литература

1. Дронова К.А., Иванов Л.А. Особенности наказания и поощрения детей от 4 до 7 лет в семье глазами родителей детей // Молодежная наука: тенденции развития. 2021. № 2. С. 6–12.
2. Захкиева Р.С.А., Висимбиева М.Р., Уматгериева Л.О. Показатели variability сердечного ритма у детей младшего школьного возраста после двигательной пробы // Известия Чеченского государственного университета им. А.А. Кадырова. 2021. № 3 (23). С. 66–71.
3. Иванова В.А., Кормушкина Е.А. Вегетативная регуляция как маркер системного дисбаланса у детей младшего возраста с социально-эмоциональными расстройствами // Физическая и реабилитационная медицина. 2020. Т. 2, № 1. С. 68–74.
4. Крысюк О.Н. Возрастные особенности биоэлектрической активности миокарда и автономной регуляции сердечного ритма у детей в возрасте 7–11 лет. Автореферат диссерт. канд. биолог. наук. М., 2007. 198 с.
5. Николаева Е.И., Ельникова О.Е., Меренкова В.С., Буркова С.А. Психофизиологические основы жизнеспособности человека в онтогенезе // Жизнеспособность человека: индивидуальные, профессиональные и социальные аспекты. М., 2016. С. 394–407.
6. Смирнова О.В., Овчаренко Е.С., Каспаров Э.В., Фефелова В.В. Реактивность вегетативной нервной системы у детей младшего школьного возраста с умственной отсталостью // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102, № 2. С. 169–174.
7. Щеглова А.Е. Роль поощрений и наказаний в системе средств воспитания детей в отечественной педагогике XVIII – первой половине XIX века // Известия ВГПУ. 2016. № 6 (110). С. 73–78.
8. Nikolaeva E.I., Burkova S.A. The influence of encouragement and punishment on the psychophysiological development of children // ICPE-2018, Psychology and Education. The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences EpSBS. 2018. V. 49. P. 482–489.

Мозговые механизмы семантики: информационный подход

А.В. Варганов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва;
a_v_vartanov@mail.ru

Изучение высших психических функций человека, процессов, связанных с речевыми значениями и сознанием, всегда было в центре внимания таких областей знания, как психология (в особенности когнитивная психология), нейрофизиология и физиология высшей нервной деятельности, современная психофизиология и кибернетика. Проблема механизмов семантического кодирования является центральной в исследованиях функционирования речи, семантической памяти, процессов порождения и использования знаний, а также сознания. Между тем общие принципы мозговых механизмов формирования и функционирования языка человека как знаковой системы с особыми свойствами еще не достаточно разработаны, хотя за последние десятилетия накоплен значительный объем эмпирических данных в этой области. Прогресс упирается также и в общую проблему взаимоотношения «психика – мозг» (или «сознание – мозг»), которая наиболее явно проявляется именно в этой области взаимосвязи «знак» (как материальный объект со своими свойствами) – «значение» (как идеальное психическое свойство функционирования материального мозга). Сюда же примыкает и проблема сознания (субъективной реальности) как особого феномена, попытки понять мозговые механизмы которого в последние десятилетия предпринимаются регулярно с завидным усердием и с различных сторон (особенно со стороны нейронаук), но пока без общепризнанного удовлетворительного результата. При этом семантика, механизмы оперирования понятиями почти во всех этих подходах к сознанию оказываются на первом плане.

Можно полагать, что прогресс и в этом направлении возможен на основе интеграции данных из трех областей – психологии (теория деятельности, уровни развития психики, психология речи и мышления, психолингвистика), физиологии ВНД (принципы кодирования информации в нервной системе, иерархия сигналов) и кибернетики (принципы и уровни управления, математические модели).

Как отмечает Д.И. Дубровский [2], явление сознания («субъективного опыта») может интерпретироваться в качестве информации о том или ином явлении действительности. Однако для не редуционистского решения необходимо учитывать уровень развития системы. Как отмечает А.Н. Леонтьев, «потребовались века, чтобы освободиться от отождествления психического и сознательного... Решающий шаг состоял в утверждении идеи о разных уровнях психического отражения [3, с. 124–125]». Отсюда следует, что информационные процессы на уровне сознания, по сравне-

нию с теми, которые совершаются на уровне психической, но не осознанной деятельности, а также на допсихическом уровне (в самоорганизующихся системах, лишенных психики), отличаются существенными особенностями «естественных кодов». «Последние не просто “понятны”; воплощенная в них информация не только обретает действительность, но также особое качество репрезентации и особое качество использования ее самоорганизующейся системой для управления [Дубровский, 2007, с. 148]». При этом, если последовательно отказываться от атрибутивного подхода, это особое качество репрезентации нельзя объявлять «свойством» субстрата или «изнанкой» какого-либо физического процесса. Оно должно зависеть только от самого «кода», его особой формы. В чем же информационная и субъективная специфика такого качества, зачем оно возникает в эволюции?

Как давно известно из физиологии и кибернетики, качество системы управления, уровень развития живых систем, а, соответственно, и «форма кода» определяется в первую очередь уровнем доступных и используемых обратных связей. Обычно выделяют три уровня обратных связей.

1) Управляющие системы без обратной связи, адаптивное функционирование которых возможно в среде с постоянно действующими факторами. Это универсальные нервные сигналы, область рефлекторных актов низшей нервной деятельности по И.П. Павлову. На этом уровне существует только один вид сигналов-стимулов, которые формируются на основе собственных схем различия системы, их можно назвать ориентирующими.

2) Управляющая система с обратной связью через внешнюю среду или автоматы первого рода. На этом уровне имеется адаптивное приспособление к изменениям в среде (но это все еще универсальные нервные сигналы, область рефлекторных актов низшей нервной деятельности по И.П. Павлову). При этом на форму кода уже необходимо наложить ограничения – декодирование должно определяться содержанием кода (модулирующего), чтобы на один и тот же стимул реакция могла изменяться в соответствии с условиями среды. На этом уровне необходимо различать два вида сигналов – ориентирующие и модулирующие. Это различие достижимо только в результате знания о функциональном использовании этих сигналов системой, т. е. исключительно в зависимости от внутреннего устройства системы, а не от самих внешних событий или свойств стимулов.

3) Управляющая система с внутренней обратной связью, или автоматы второго рода, получает новые возможности – опережающее приспособление к изменениям в среде на основе внутренней

модели. Иногда автоматы второго рода также называют автоматами с памятью. Но дело не в самой памяти, а в том, что есть возможность строить прогноз на основе предыдущего опыта. Это уже уровень первых сигналов-образов (элементарные нервно-психические процессы высшей нервной деятельности) по И.П. Павлову. Наличие внутренней обратной связи требует, чтобы форма кода допускала двойное перекодирование, т. е. была единая форма афферентного, эфферентного и модулирующего кодов. На этом уровне (который включает и внешнюю обратную связь предыдущего уровня) необходимо выделять уже три типа сигналов – ориентирующие, модулирующие и сигналы внутренней обратной связи. Последние выделяются системой, поскольку она должна различать события внешней среды и события, моделируемые с помощью внутренней обратной связи на «внутреннем экране».

Анализируя принципы кодирования информации в мозге, можно заметить, что с информационной точки зрения для объяснения сознания и высших психических функций человека, речи и семантики необходимо ввести новый, дополнительный уровень обратной связи. Даже внутренняя обратная связь характеризует все еще первую (по классификации И.П. Павлова) сигнальную систему. Это самоорганизующаяся (аутопойетическая) система с экстерииоризированной (вынесенной вовне) внутренней обратной связью. Такая обратная связь основана на способности искусственно создавать новый, вторичный источник информации о внешнем мире. Понятно, что если одна и та же информация размещена на разных носителях, то можно считать это ее разными кодовыми воплощениями. Из этого следует одна очень важная особенность: можно вторично «объективировать» состояние собственного носителя! Например, высказать или записать мысль, которая характеризует некоторую ситуацию, так, чтобы определенные состояния бумаги (или колебания воздуха), например, соответствовали определенным состояниям мозга. Тогда при чтении этой записи у нас опять возникнет та же мысль. Это способ искусственно создать новый источник той же информации, т. е. теперь одна и та же информация сможет быть порождена на основе разных источников. Получается двойной изоморфизм: 1) состояние среды (первичный источник) – состояние субстрата воспринимающей аутопойетической системы, 2) состояние субстрата системы – другое, искусственно созданное собственными действиями аутопойетической системы состояние среды (будущий вторичный источник). Это очень важное свойство, которое, как представляется, может характеризовать специфику высшего уровня развития психических функций и сознания человека.

При этом с точки зрения механизма внутренние мозговые коды теперь могут быть «материализованы» путем специальных внешних действий, которые можно назвать информационными. Такие действия производят физические события или состояния, которые по определенным параметрам

(воспринимаемым системой качествам) закономерно соответствуют особенностям этих мозговых кодов (особенностям состояния носителя). Эти бывшие командные коды, используемые на «внутреннем экране» (при функционировании внутренней обратной связи для прогнозирования изменений внешней среды) теперь оказываются как бы вынесенными наружу, они уже могут существовать независимо в виде колебания воздуха или в другом материальном виде. При этом другая (или та же самая) аутопойетическая (самоорганизующаяся) система, которая «понимает» этот язык, может воспринять эти состояния и восстановить исходные команды, чтобы использовать их для построения и функционирования своей внутренней модели.

Для самоорганизующейся (аутопойетической) системы возникновение такого способа есть принципиально важный момент, открывающий новые возможности дальнейшей эволюции в результате образования обратной связи нового уровня. Ведь можно таким способом «передавать данные» самому себе, породить и использовать эти вторичные командные коды для самоуправления, что хорошо соотносится с функцией знака как внутреннего орудия или средства высшей психической деятельности в теории деятельности Л.С. Выготского, А.Н. Леонтьева, С.Л. Рубинштейна, Ж. Пиаже. В итоге получается удвоение кодового представления для одной и той же информации о внешнем мире. Это и есть та самая «вторая сигнальная», или знаковая, система, т. е. язык человека.

Таким образом, объект, порожденный как вторичный источник информации, и есть знак, сигнал, который воспринимается как управляющий код, а не как «данные» (первичные ориентирующие сигналы). Значение знака – выполняемое системой действие (заданное командой-знаком) на внутреннем «экране», моделирующее (заменяющее) внешнее предметное действие действием на внутреннем «экране». Сами знаки в этом случае являются вторичными ориентирующими сигналами, поскольку они характеризуют уже другую реальность, относятся к первичному источнику информации. А сама информация теперь как бы представлена дважды – во-первых, возникает соответствие состояний одной области мозга с состояниями первичного источника информации, а во-вторых – соответствие состояний другой области мозга с состояниями вторичного источника информации. Но информация-то ведь та же самая! В итоге получается удвоенное соответствие: и внутри мозга (1) между разными его областями (с возможностью перевода информации из одного вида, например, из зрительного образа восприятия некоторого объекта, в другой – слухоречевую форму обозначающего этот объект слова), и во внешней среде (2), когда одним объектам начинают соответствовать другие объекты-знаки. Но информационный смысл знака, в отличие от дополнительного ярлыка-признака, вовсе не в дублировании объектов обозначения, а в том, чтобы иметь

возможность полностью реконструировать объекты (в отношении их наиболее важных для деятельности свойств) и заменить их во внутреннем плане, действовать со знаками так же, как с объектами, но в отсутствие самих объектов.

Язык человека как знаковая система предназначен скорее для описания (воссоздания) или комментирования ситуации (как это показано С.А. Бурлак [3]), чем для коммуникации. Коммуникация животных осуществляется на основе первой сигнальной системы, побуждающих коммуникативных сигналов, которые являются не знаками в вышеописанном смысле, а дополнительными признаками ситуации. Человек также вовсе не отказался от этой системы – эмоциональный уровень регуляции и коммуникации исправно служит ему как в невербальной форме, так и в вербальной, интегрирован в язык и речь. Но новые возможности вторичного (знакового) кодирования были использованы и в целях коммуникации, развития вторичной коммуникативной системы с особыми свойствами. Качественный скачок в возможностях «комментирования» ситуации и передачи сигналов для построения ее «образа» появился на основе количественных изменений (эволюции) мозговых кодов, и происходит каждый раз при усвоении речи ребенком. Внешнее существование (вне субъекта) кодов (знак – как «превращенная форма мозгового кода»), образующих систему коммуникации, сделало возможным эволюцию и отбор этих кодов без непосредственной биологической эволюции носителя этой информации (человека). Как известно, естественный отбор в эволюционной нише человека шел на усиление способности понимать причинно-следственные связи. Знаковая система – человеческий язык – вследствие опыта практической деятельности в коэволюции с социальной системой все более совершенствовалась с точки зрения общности и правильности отражения в понятиях законов природы и свойств среды. Это может происходить и в результате «горизонтального» обмена – отбора системы наиболее важных для всего вида ориентировочных признаков (качеств), отражаемых отдельными индивидами. Имеется и «вертикальное» накопление опыта и знаний предыдущих поколений, которые, собственно, и фиксируются в языке и понятиях. В этом есть развитие культуры и науки, результаты которой (в том числе и сам язык) существуют уже объективно (вне конкретного человека), поэтому их можно по праву обозначить категорией «идеальное».

Можно сказать, что идеальное – это категория для обозначения информационного содержания как некоторого обобщенного (генерализованного) инварианта мозговых кодов (существующих как субъективно в процессе функционирования мозга, так и объективно, в форме материального знака).

С другой стороны, удвоенное кодирование информации определяет и новое качество отражения – субъективную реальность, данную в самонаблюдении, т. е. сознание. Сознание нельзя сводить только к состоянию, как это часто делается, особенно в медицине. Хотя определенный уровень функционального состояния необходим для сознательного функционирования, но он не определяет специфики сознания. Сознание также нельзя рассматривать как отдельный, самостоятельный процесс, поскольку можно говорить о разных психических процессах – восприятии, памяти, мышление, внимание и др. – которые протекают на разных уровнях, реализуются как сознательные либо как неосознаваемые процессы. Сознание (и обеспечивающие его нейронные механизмы, возможно, распределенные и иерархически соподчиненные в зависимости от истории формирования) следует считать особым качеством (уровнем) протекания других психических процессов. Противопоставление «сознательного» – «досознательного» продуктивнее провести по форме кода, а не по мозговому субстрату: если во внутренней репрезентации управляющей системы для перекодирования поступающей информации используются унифицированные с внешне существующей кодовой (знаковой) системой управляющие коды, позволяющие осуществлять перекодирование из одной формы в другую, то имеет место сознательное представление. При использовании знаковой системы и соответствующего ей кода все вышеописанные преимущества развития и функционирования достигаются без особых дополнительных требований к ресурсам «субстрата», только путем определенных изменений кодовой формы внутреннего представления информации.

Литература

1. Бурлак С.А. Происхождение языка: факты, исследования, гипотезы. М. : Астрель: CORPUS, 2011. 464 с.
2. Дубровский Д.И. Сознание, мозг, искусственный интеллект. М., 2007.
3. Леонтьев А.Н. Деятельность. Сознание. Личность. М. : Политиздат, 1975. 304 с.

Методика оценки синхронизованности сердечного ритма у участников диады при решении сложных когнитивных задач

А.В. Варфоломеева, А.Г. Тищенко, Ю.И. Александров

Институт психологии РАН, Москва;
varflany@gmail.com
antongtishenko@gmail.com
yuraalexandrov@yandex.ru

С позиций системно-эволюционного подхода [8] проблема взаимосогласования активностей индивидов для достижения коллективного результата обеспечивается взаимосогласованием индивидуальных системогенезов [4], лежащих в основе научения [1]. Решение этой проблемы позволит соотнести результаты построения типологии участников исследования, реализующих различающиеся способы решения [7], и достижение коллективного результата в диадах, участники которых реализуют различающиеся способы решения.

В работе [4] описаны парадигмальные группы, оперирующие понятиями «совместная активность», «синхронизация», «интерперсональная координация», «групповой поток», которые принципиально канализируют возможные объяснения феноменологии достижения коллективного результата, проявляющейся в ситуации совместного выполнения заданий. Также определено [5], что терминология, применяемая для описания физиологических показателей в процессе выполнения совместной деятельности, такая, как нейрофизиологические синхронии (neurophysiologic synchronies), физио-поведенческая синхрония (physio-behavioral synchronicity) и социально-психофизиологическое соответствие (social psychophysiological compliance), соответствует традиционной психофизиологии – любому психическому процессу соответствует специфический физиологический процесс и установление физиологических механизмов психических процессов возможно через выявление их корреляционных отношений (см. сравнение системной и традиционной психофизиологии, например, в работе [9]). В связи с этим феноменология взаимосогласования в рамках системно-эволюционного подхода может быть выражена как взаимно-со-действие – «...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, с. 35]. Таким образом, расширяя эту формулировку, можно определить, что достижение коллективного результата происходит через взаимосогласование индивидуально-специфичного опыта, которое проявляется в межиндивидуальной координации общеорганизменных (нейрональные и висцеральные составляющие) функциональных систем.

Методика

Проводилась оценка показателей variability сердечного ритма (nRR, sdNN, LF, HF, LF/HF, SampEn) у участников исследования ($N = 142$; Med = 20 лет), решавших сложные когнитивные задачи («Рыцари и лжецы» – $N = 15$; «Моральные дилеммы» – $N = 15$). Каждый участник проходил предварительное тестирование, во время которого заполнял опросник «Шкала аналитичность-холистичность» и тест «Стандартные прогрессивные матрицы: параллельные формы» Дж. Равена в соответствии с протоколом [7]. После этого участники решали сложные когнитивные задачи индивидуально, а затем в диадах (подробное описание задач см. в работе [3], общая схема исследования представлена на рис. 1).

Предварительная оценка согласованности сердечного ритма проводилась при помощи автокорреляционного и кросскорреляционного анализа. С учетом того, что длина числового ряда, представленного RR-интервалами, могла различаться у участников в диаде, подбирались оптимальное количество лагов. Для анализа отбирались диады, которые по поведенческим характеристикам оказывались наиболее результативными и по предположению в большей степени могли обладать ожидаемой картиной согласованности сердечного ритма.

Результаты и их обсуждение

В ходе отбора диад были определены две диады с полной записью, без артефактов и без «сдвоенных» RR-интервалов. У каждой из этих диад анализировались временные ряды, соответствующие решению задач (с 1 по 30). Для иллюстрации были отобраны наиболее характерные ситуации (рис. 2 и 3).

На рис. 2 представлена ситуация решения двух задач (28 и 30), для каждой из которых характерна различающаяся картина согласованности сердечного ритма у одного индивида (см. А и Б – задача 28, Г и Д – задача 30) и у обоих индивидов (см. В – задача 28, Е – задача 30). Для индивидов WC44 и WC45 отмечается внутренняя несогласованность (отрицательные пики, выходящие за 5 % зону достоверности) сердечного ритма на протяжении решения задачи 28 и смещение согласованности сердечного ритма на 20 RR-интервалов (см. В; lag = ± 20). Асимметрия влево относительно точки 0 указывает на «отставание» индивида WC45,

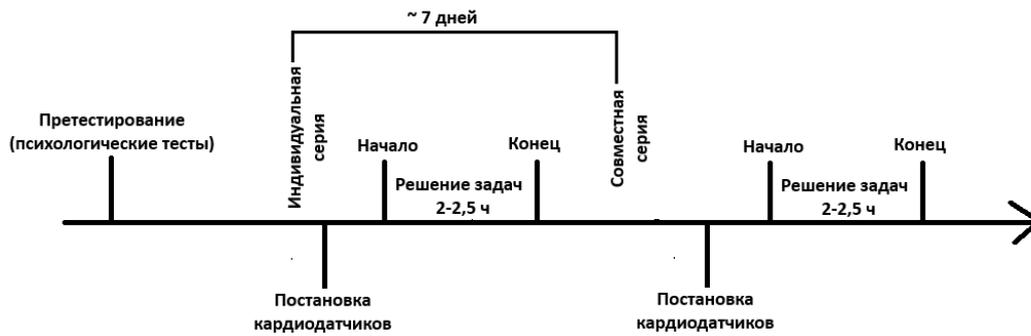


Рис. 1. Основные этапы сценария исследования

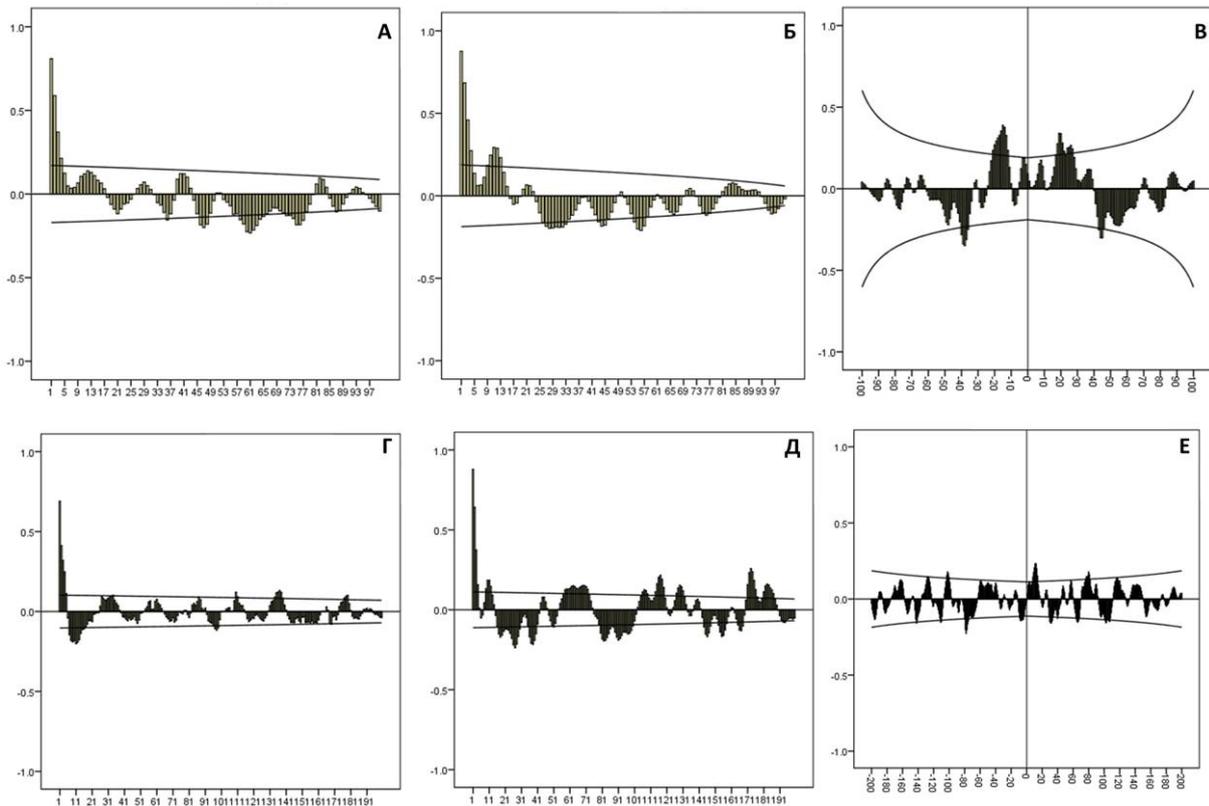


Рис. 2. Результаты авто- и кросскорреляционного анализа для диады WC44-WC45 по 28 (А, Б, В) и по 30 (Г, Д, Е) задачам. Вертикальными линиями обозначена точка 0

асимметрия вправо – WC44. При решении 30 задачи отмечается сокращение лага и его близость к точке 0.

На рис. 3 представлена ситуация решения двух задач (15 и 25), для каждой из которых характерна сходная картина согласованности сердечного ритма у одного индивида (см. А и Б – задача 15, Г и Д – задача 25) и у обоих индивидов (см. В – задача 15, Е – задача 25). Для индивидов WC46 и WC47 отмечается периодичность в степени согласованности сердечного ритма на протяжении решения задачи 15 и периодичность в согласованности сердечного ритма у обоих индивидов (см. В).

Предварительные результаты позволяют рассматривать процессы взаимосогласования индивидуальных системогенезов с учетом ранее выде-

ленных способов решения текстовых задач [7] и поведенческой оценки вариантов взаимосогласования индивидов [4]. Кроме того, важно заметить, что специфика согласованности или рассогласованности может быть обусловлена последовательностью задач. В работе [6] было определено, что эпоха анализа в 30 задач структурируются «волнообразно» по показателям времени решения. В настоящей работе не проводился специальный анализ для определения вклада последовательности задач в согласование сердечного ритма у индивидов в диаде. Однако полученные ранее результаты – нелинейная организация реализуемого поведения при решении задач (волнообразный характер), различающегося для участников с определенным соотношением составляющих

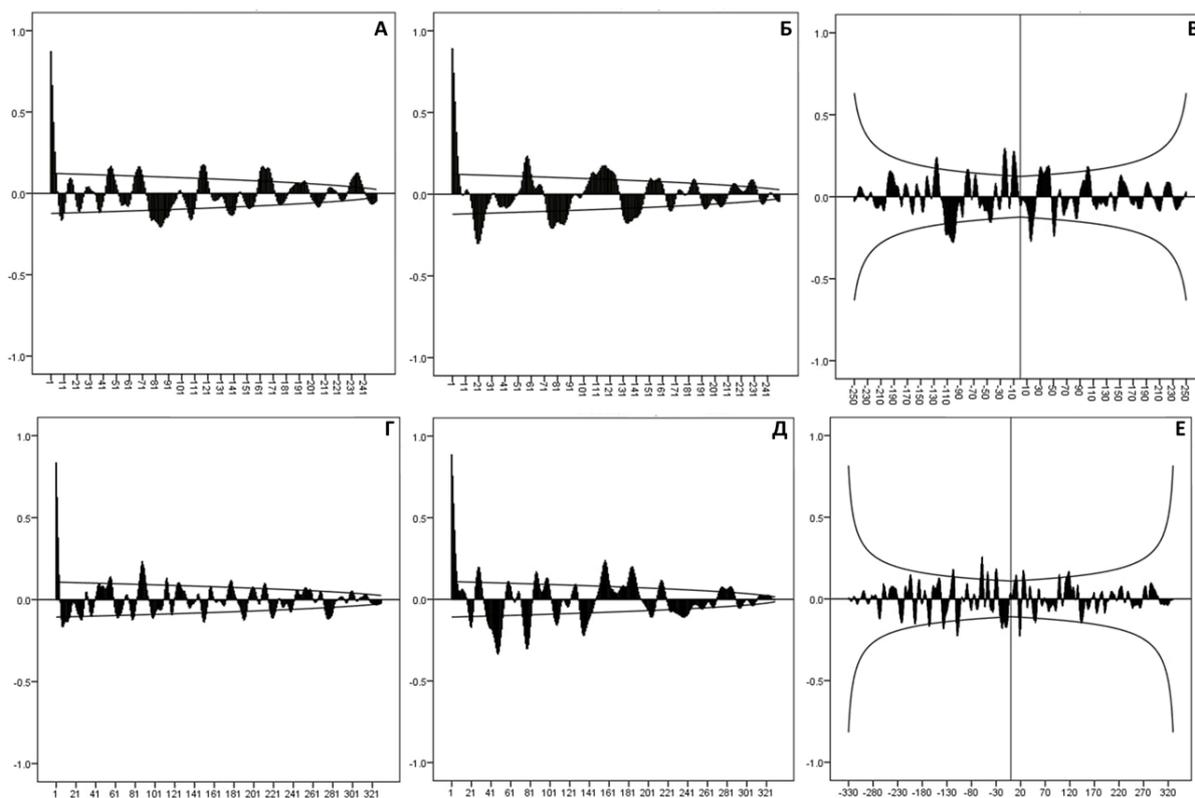


Рис. 3. Результаты авто- и кросскорреляционного анализа для диады WC46-WC47 по 15 (А, Б, В) и по 25 (Г, Д, Е) задачам. Вертикальными линиями обозначена точка 0

тела (выраженность жировой и мышечной ткани), и нелинейная динамика ВСР (степенная функция) – указывают на варианты процессов системогенеза и их метаболическое обеспечение в реализуемом поведении и могут являться обоснованием для проведения многомерного анализа и установления отношений сопряженности между определенным в этих исследованиях набором свойств индивидов.

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

Литература

1. Александров Ю.И. Научение и память: традиционный и системный подходы // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2005. Т. 55, № 6. С. 842–860.
2. Анохин П.К. Принципы системной организации функций. М. : Наука, 1973.
3. Апанович В.В., Тищенко А.Г., Знаков В.В., Александров Ю.И. Конструирование блоков аналитических и холистических задач и их эмпирическая проверка // Вопросы психологии. 2020. № 4. С. 142–154.
4. Варфоломеева А.В., Тищенко А.Г., Александров Ю.И. Варианты взаимосогласования индивидов со сходными и различающимися психологическими

характеристиками // Экспериментальная психология. 2024. Т. 17, № 2. С. 84–97. DOI: <https://doi.org/10.17759/expsy.2024170205>.

5. Варфоломеева, А.В. Индивидуальные вариации системной организации поведения: электрокардиография и анализ биоэлектрического импеданса / А.В. Варфоломеева, А.Г. Тищенко, Ю.И. Александров // Психологический журнал. 2025. Т. 46, № 1. С. 58–65. DOI 10.31857/S0205959225010065.

6. Варфоломеева А.В., Тищенко А.Г., Александров Ю.И. Динамика показателей variability сердечного ритма при различающемся соотношении составляющих тела // Биосистемы: организация, поведение, управление: тезисы докладов 78-й Всероссийской с международным участием школы-конференции молодых ученых. Нижний Новгород : ННГУ, 2025. С. 57.

7. 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.

8. Швырков В.Б. Системно-эволюционный подход к изучению мозга, психики и сознания // Психол. журн. 1988. Т. 9, № 1. С. 132–148.

9. Швырков В.Б. Психофизиология // Тенденции развития психологической науки. М. : Наука, 1989.

Перекрестные взаимодействия в регуляции локального биосинтеза и ремоделирования цитоскелета синапсов

С.О. Вечкапова, А.С. Ратушняк, А.Л. Проскура

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск;
annleop@mail.ru

В работе рассматриваются молекулярные механизмы перекрестных взаимодействий в регуляторных сетях локального биосинтеза и ремоделирования цитоскелета в возбуждающих синапсах нейронов поля СА1 гиппокампа после индукции долговременной потенциации.

Введение

Нейроны являются уникальными клетками. Одной из их отличительных особенностей является наличие протяженных отростков (аксонов и дендритов), которые ответственны как за прием информации извне, так и коммуникацию в нейрональной сети. Причем в ряде случаев длина таких выростов может достигать расстояний до сотен сантиметров от тел клеток у высших позвоночных. Их формирование, поддержание и правильное функционирование в значительной степени зависят от координации процессов в сложных цифровых молекулярных машинах. Эти машины реагируют на непрерывный и разнообразный каскад внешних стимулов, обрабатывают информацию, часто без достаточного времени для связи с собой.

Локальный, осуществляемый вне сомы клетки, синтез белка считается энергетически выгодным по сравнению с транспортировкой отдельных белков в дистальные отростки, поскольку трансляция одной молекулы мРНК может генерировать несколько белков, что позволяет радикально изменять локальный протеом и последующие быстрые ответы при получении сигналов [1].

Цитоскелет нейронов является ключевым регулятором важнейших молекулярных и клеточных событий [2]. Его динамичность, способность к быстрому перестройкам позволяет приспособиться к возникающим клеточным потребностям в ответ на несколько стимулов.

В данной работе изложены результаты реконструкции и анализа межмолекулярных взаимодействий в регуляторных сетях локального биосинтеза и ремоделирования цитоскелета в возбуждающих синапсах нейронов поля СА1 гиппокампа.

Локальный биосинтез в дендритах нейронов гиппокампа

Гиппокамп вовлечен как в реализацию высших когнитивных функций, так и в модуляцию широкого спектра физиологических процессов в организме [3, 4].

Постсинаптической частью большинства возбуждающих глутаматергических синапсов гиппокампа являются дендритные шипики, обеспечивающие прием и быструю обработку разнообразных по своей природе сигналов [5].

В дендритах пирамидных нейронов гиппокампа присутствуют все необходимые компоненты для биосинтеза белков [6]. В литературе отмечается нечастое наличие у них элементов вне соматического аппарата Гольджи (outposts), что, по видимому, позволяет предположить существование независимого от аппарата Гольджи секреторного пути, белки которого успешно обеспечивают локальные и временные синаптические модификации [7, 8].

Регуляция локального биосинтеза и ремоделирования цитоскелета после индукции долговременной потенциации

Долговременная потенциация (ДВП) проявляется в усилении синаптических связей на протяжении длительного времени, в основе чего лежит активность глутаматных рецепторов [9].

В гиппокампе нейротрансмиссия контролируется ионотропными глутаматными рецепторами, НМДА (N-метил-D-аспартат) и АМПА (α -амино-3-гидрокси-5-метил-4-изоксазолпропионовая кислота) типов. АМПА рецепторы с субъединицами GluR2 и GluR3 (GluR2/3) определяют базовую нейротрансмиссию и индукцию ДВП. После индукции ДВП под контролем НМДАР происходит интенсификация их вывода из синапса и эндоцитоз (ключевым регулятором является протеинкиназа С (ПКС), рис. 1, А), а также введение АМПАР с субъединицей GluR1 (рис. 1, Б), что увеличивает плотность АМПАР в зоне синаптического контакта, определяя новую эффективность синапса. Поддержание нового уровня нейротрансмиссии сопряжено с заменой GluR1-АМПАР на GluR2/3 (рис. 1, В), плотность которых далее поддерживается конститутивным рециклированием (рис. 1, Г) [10–12].

Транскрипция всех без исключения генов эукариот осуществляется в ядре. Часть образуемой мРНК не транслируется в соме, а направляется к местам своей локальной трансляции. Так, в течение 2 часов после индукции ДВП наблюдается значительное увеличение мРНК в дендритах [13].

Ключевым белком, обеспечивающим как транспортировку мРНК из сомы в дендриты, так и подавление преждевременной инициации трансляции, является FMRP (Fragile X messenger

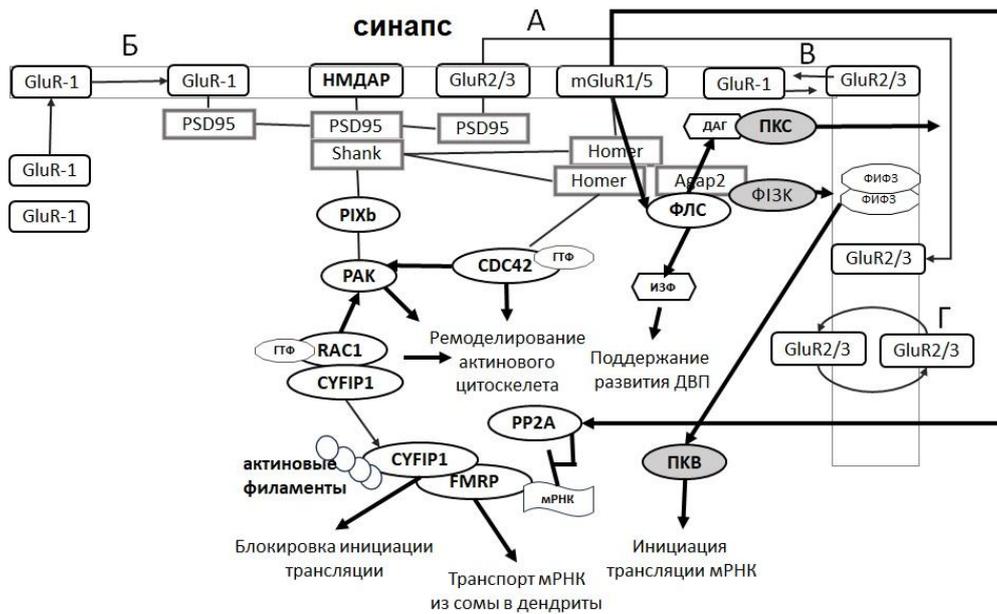


Рис. 1. Схема регуляторных путей локального синтеза и ремоделирования цитоскелета синапса. Описание в тексте. НМДАР – НМДА (N-метил-D-аспартат) рецептор GluR-1 – субъединица АМПАР (АМПА (α -амино-3-гидрокси-5-метил-4-изоксазолпропионовая кислота) рецептор); GluR2/3 – АМПАР с субъединицами GluR2 и GluR3; mGluR1/5 – метаботропные глутаматные рецепторы; скаффолд-белки: PSD95 (post synaptic density protein), Shank (SH3 and multiple ankyrin repeat domains protein), Homer (Homer protein homolog 1); AGAP2 – Arf-GAP with GTPase, ANK repeat and PH domain-containing protein 2; PIX – PAK-interacting exchange factor beta; Rac1 – Ras-related C3 botulinum toxin substrate 1; Cdc42 – Cell division control protein 42 homolog; FMRP – Fragile X messenger ribonucleoprotein; CYFIP1 – Cytoplasmic FMR1-interacting protein 1; PAK – p21-activated kinase; ФИФ3 – фосфатидилинозитол-(3,4,5)-трифосфат; ДАГ – диацилглицерин, ИЗФ – инозитолтрифосфаты; ФЛС – фосфолипаза С; ПКС – протеинкиназа С; ПКВ – протеинкиназа В; ФИЗК – фосфоинозитол-3-киназа. \blackleftarrow активирующие регуляторные взаимодействия; \blackrightarrow переходы в процессах; \blacksquare блокировка процесса

ribonucleoprotein), который кодируется геном *FMR1* [14–16]. Мишенями FMRP выступает широкий спектр белков, задействованных в структурной пластичности и регулировании синаптической эффективности [17], в том числе субъединицы GluR1 и GluR2 АМПАР, скаффолд-белки, в частности, PSD95 [18], который обеспечивает закрепление глутаматных рецепторов в зоне синаптического контакта, а также входит в ключевые для синаптической пластичности макрокомплексы белков шипика [19].

Синдром ломкой X-хромосомы (Fragile X syndrome, FXS) характеризуется задержкой развития и умственной отсталостью, считается ведущей моногенной причиной аутизма [20–22]. FXS вызывается мутацией (> 200 повторов CGG) в гене *FMR1* и, несмотря на прогресс в методах и подходах терапии [23], исследование функции FMRP остается актуальной задачей.

Непосредственным партнером в регуляции локальной трансляции FMRP является белок CYFIP1 (Cytoplasmic FMR1-interacting protein 1), который выступает посредником между FMRP-мРНК и белковой машиной трансляции [24, 25]. Он напрямую взаимодействует с факторами инициации трансляции, но не с мРНК. Ассоциация FMRP-CYFIP1 формирует полноценный комплекс блокировки инициации трансляции.

Метаботропные глутаматные рецепторы шипиковых синапсов гиппокампа – mGluR1 и 5, связанные с G-белковым комплексом (Gq/11), активируют

фосфолипазу С (ФЛС), продуцирующую диацилглицерол (ДАГ) и инозитолтрифосфаты (ИЗФ). ДАГ активирует протеинкиназу С (ПКС), а ИЗФ обеспечивает внутриклеточный подъем уровня ионов кальция, необходимый для развития ДВП [26].

Активация mGluRs снимает трансляционное подавление FMRP через дефосфорилирование протеинфосфатазой 2А (PP2A на рис. 1), что приводит к его дальнейшей деградации и запуску трансляции его мишеней [27, 28].

Фосфоинозитолтрифосфаты (ФИФ3) – вторичные посредники, активно нарабатываются фосфоинозитол-3-киназой (ФИЗК) после индукции ДВП и вовлечены в запуск трансляции белка через протеинкиназу В (ПКВ) [29]. mGluR1/5 на синапсах входят в макрокомплексы НМДАР через взаимодействие со скаффолд-белками Homer [30]. Rong с соавторами показали возможность формирования комплекса Homer-mGluR-AGAP2-ФИЗК. AGAP2 (Arf-GAP with GTPase, ANK repeat and PH domain-containing protein 2) при этом усиливает активность ФИЗК [31].

По базе данных Swiss-Prot AGAP2 обладает доменом связывания с ФЛС, формируя таким образом комплекс белков, в котором происходит пространственное сближение, с одной стороны, mGluRs с их эффектором ФЛС, с другой – конвергенцию сигнальных путей глутаматных рецепторов шипика с каскадом активации белкового синтеза (рис. 1).

Дендритные шипики структурно высоко динамичны, что важно для синаптических модификаций, связанных с обучением, старением и нейродегенеративными заболеваниями [32]. Цитоскелет служит не только платформой для трафика мРНК, но и действует как каркас для организации компонентов трансляционного аппарата [33]. Ремоделирование цитоскелета достигается циклом полимеризации и деполимеризации филаментов на основе мономеров, которые также синтезируются локально [34].

Ключевыми регуляторами ремоделирования актинового цитоскелета в дендритном шипике после индукции ДВП являются малые ГФАЗы Rac1 (Ras-related C3 botulinum toxin substrate 1) и Cdc42 (Cell division control protein 42 homolog). ДВП запускает сигнальные каскады этих белков через формирование специфических комплексов.

Стоит отметить, что CYFIP конститутивно является частью комплекса ремоделирования актина, связанного с Rac1, таким образом выступая мостиком между трансляционной регуляцией и актиновым цитоскелетом [35, 36].

Киназы семейства РАК (p21-activated kinase), эффекторы малых ГТФаз Rac1 и Cdc42 также включены в НМДА-рецепторные макрокомплексы. РАК напрямую связаны с PIX (РАК-interacting exchange factor beta), активаторами Rac1 [37], которые закреплены в макрокомплексах НМДАР через скаффолд-белки Shank (SH3 and multiple ankyrin repeat domains protein) [38].

Santini с соавторами предполагают, что FMRP захватывает CYFIP из комплексов ремоделирования актина Rac1, а недостаток в синтезе FMRP способствует излишней экспрессии сигнального пути Rac1/РАК, что будет способствовать генерации тонких, незрелых шипиков [39].

Таким образом, в дендритных шипиках пирамидных нейронов гиппокампа существуют точки пересечения сигнальных путей регулирования локального синтеза белков с сигнальными путями контроля глутаматергической передачи и реорганизации актинового цитоскелета в течение индукции и развития долговременной потенциации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Литература

1. *Gasparski A.N. et al.* Regulation and outcomes of localized RNA translation // Wiley Interdiscip Rev RNA. 2022. V. 13, no. 6. P. e1721.
2. *MacGillavry H.D., Hoogenraad C.C.* Membrane trafficking and cytoskeletal dynamics in neuronal function // Mol Cell Neurosci. 2018. V. 91. P. 1–2.
3. *Kjelstrup K.B. et al.* Finite scale of spatial representation in the hippocampus // Science. 2008. V. 321. P. 140–143.
4. *Hawley D.F. et al.* Differential response of hippocampal subregions to stress and learning // PLoS One. 2012. V. 7. P. e53126.
5. *Proskura A.L. et al.* Synapse as a multi-component and multi-level information system. Studies in computational intelligence. 2018. V. 736. P. 186–192.
6. *Kennedy M.J., Hanus C.* Architecture and dynamics of the neuronal secretory network // Annu Rev Cell Dev Biol. 2019. V. 35. P. 543–566.
7. *Bowen A.B. et al.* Golgi-independent secretory trafficking through recycling endosomes in neuronal dendrites and spines // Elife. 2017. V. 6. P. e27362.
8. *Hanus C. et al.* Unconventional secretory processing diversifies neuronal ion channel properties // Elife. 2016. V. 5. P. e20609.
9. *Shepherd J.D., Huganir R.L.* The cell biology of synaptic plasticity: AMPA receptor trafficking // Annu. Rev. Cell. Rev. Cell. Dev. Biol. 2007. V. 23. P. 613–643.
10. *Проскура А.Л. и др.* Межмолекулярные взаимодействия в функциональных системах нейрона // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2013. Т. 17. С. 620–628.
11. *Newpher T.M., Ehlers M.D.* Glutamate receptor dynamics in dendritic microdomains // Neuron. 2008. V. 58. P. 472–497.
12. *Tanaka H., Hirano T.* Visualization of subunit-specific delivery of glutamate receptors to postsynaptic membrane during hippocampal long-term potentiation // Cell. Rep. 2012. V. 1. P. 291–298.
13. *Bourne J.N. et al.* Polyribosomes are increased in spines of CA1 dendrites 2 h after the induction of LTP in mature rat hippocampal slices // Hippocampus. 2007. V. 17, no. 1. P. 1–4.
14. *Fernandez-Moya S.M. et al.* Meet the players: local translation at the synapse // Front Mol Neurosci. 2014. V. 7. P. 84.
15. *Dicthenberg J.B. et al.* A direct role for FMRP in activity-dependent dendritic mRNA transport links filopodial-spine morphogenesis to fragile X syndrome // Dev Cell. 2008. V. 14, no. 6. P. 926–939.
16. *Wang H. et al.* Dynamic association of the fragile X mental retardation protein as a messenger ribonucleoprotein between microtubules and polyribosomes // Mol Biol Cell. 2008. V. 19, no. 1. P. 105–114.
17. *Schütt J. et al.* Fragile X mental retardation protein regulates the levels of scaffold proteins and glutamate receptors in postsynaptic densities // J Biol Chem. 2009. V. 284, no. 38. P. 25479–25487.
18. *Muddashetty R.S. et al.* Dysregulated metabotropic glutamate receptor-dependent translation of AMPA receptor and postsynaptic density-95 mRNAs at synapses in a mouse model of fragile X syndrome // J Neurosci. 2007. V. 27, no. 20. P. 5338–5348.
19. *Kato A.S. et al.* Hippocampal AMPA receptor gating controlled by both TARP and cornichon proteins // Neuron. 2010. V. 68, no. 6. P. 1082–1096.
20. *Hagerman R.J. et al.* Fragile X syndrome // Nat Rev Dis Primers. 2017. V. 3. P. 17065.
21. *Reches A., Fragile X.* Syndrome: Introduction // Methods Mol Biol. 2019. V. 1942. P. 3–10.
22. *Deng P.Y., Klyachko V.A.* Channelopathies in fragile X syndrome // Nat Rev Neurosci. 2021. V. 22, no. 5. P. 275–289.
23. *Protic D., Hagerman, R.* State-of-the-art therapies for fragile X syndrome // Dev Med Child Neurol. 2024. V. 66, no. 7. P. 863–871.
24. *Napoli I. et al.* The fragile X syndrome protein represses activity-dependent translation through CYFIP1, a new 4E-BP // Cell. 2008. V. 134, no. 6. P. 1042–1054.
25. *Abekhouk S., Bardoni B.* CYFIP family proteins between autism and intellectual disability: links with Fragile X syndrome // Front Cell Neurosci. 2014. V. 8. P. 81.

26. Lee H.G. *et al.* The role of metabotropic glutamate receptors in Alzheimer's disease // *Acta. Neurobiol. Exp. (Wars)*. 2004. V. 64, no. 1. P. 89–98.
27. Narayanan U. *et al.* FMRP phosphorylation reveals an immediate-early signaling pathway triggered by group I mGluR and mediated by PP2A // *J Neurosci*. 2007. V. 27, no. 52. P. 14349–14357.
28. Nalavadi V.C. *et al.* Dephosphorylation-induced ubiquitination and degradation of FMRP in dendrites: a role in immediate early mGluR-stimulated translation // *J. Neurosci*. 2012. V. 32, no. 8. P. 2582–2587.
29. Faes S., Dormond O. PI3K and AKT: unfaithful partners in cancer // *Int J Mol Sci*. 2015. V. 16, no. 9. P. 21138–21152.
30. Shiraishi-Yamaguchi Y. *et al.* Interaction of Cupidin/Homer2 with two actin cytoskeletal regulators, Cdc42 small GTPase and drebrin, in dendritic spines // *BMC Neurosci*. 2009. V. 10. P. 25.
31. Rong R. *et al.* PI3 kinase enhancer-homer complex couples mGluRI to PI3 kinase, preventing neuronal apoptosis // *Nat Neurosci*. 2003. V. 6, no. 11. P. 1153–1161.
32. Lei W. *et al.* Actin cytoskeleton in dendritic spine development and plasticity // *Curr Opin Neurobiol*. 2016. V. 39. P. 86–92.
33. Bramham C.R. Local protein synthesis, actin dynamics, and LTP consolidation // *Curr Opin Neurobiol*. 2008. V. 18, no. 5. P. 524–531.
34. Grantham J. *et al.* Controlling the cortical actin motor // *Protoplasma*. 2012. V. 249, no. 4. P. 1001–1015.
35. Pilpel Y., Segal M. Rapid WAVE dynamics in dendritic spines of cultured hippocampal neurons is mediated by actin polymerization // *J. Neurochem*. 2005. V. 95, no. 5. P. 1401–1410.
36. Abekhouk S. *et al.* New insights into the regulatory function of CYFIP1 in the context of WAVE- and FMRP-containing complexes // *Dis Model Mech*. 2017. V. 10, no. 4. P. 463–474.
37. Zhang H. *et al.* A GIT1/PIX/Rac/PAK signaling module regulates spine morphogenesis and synapse formation through MLC // *J. Neurosci*. 2005. V. 25, no. 13. P. 3379–3388.
38. Manser E. *et al.* PAK kinases are directly coupled to the PIX family of nucleotide exchange factors // *Mol. Cell*. 1998. V. 1, no. 2. P. 183–192.
39. Santini E. *et al.* Reducing eIF4E-eIF4G interactions restores the balance between protein synthesis and actin dynamics in fragile X syndrome model mice // *Sci Signal*. 2017. V. 10, no. 504. P. eaan0665.

Оценка пластичности мозга детей раннего возраста

В.Н. Виногорова

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург;
vik.25@bk.ru

В настоящее время под пластичностью понимается внутренне присущее свойство нервной системы, которое не возникает в экстренных случаях, а активно функционирует на протяжении всей жизни. Мозг сейчас представляется как непрерывно изменяющаяся нейронная структура, активность которой вызывает пластические перестройки при активации каждого сенсорного входа, возникновении двигательного акта, поиске вербальных или образных ассоциаций, включении системы подкрепления, планировании действий или понимании происходящего [7]. Изменения на поведенческом уровне и изменения в мозге не прямо соответствуют друг другу, но взаимосвязаны между собой [1].

Данные исследований, накопленные на протяжении десятилетий и посвященные изучению функций мозга и поведения, говорят о том, что человеческий мозг более гибок в раннем возрасте [6]. Исследования на животных выявили множество клеточных и молекулярных механизмов, которые делают нейронные сети более функционально гибкими в критические периоды развития [2, 4]. Нервная система людей развивается намного дольше по сравнению с приматами, что позволяет опыту продолжительнее влиять на функции мозга [3]. Процессы развития нервной системы, такие как синаптогенез, синаптический прунинг и миелинизация, разворачиваются на протяжении всего детства, при этом многие высшие когнитивные области достигают полной зрелости только после подросткового возраста, а по некоторым данным, к 30 годам [10].

Таким образом, мозг ребенка максимально пластичен, наиболее чувствителен к опыту в раннем детстве. Когнитивная гибкость, которая относится к высшим нейрокогнитивным процессам, связанным, в том числе, со способностью адаптироваться к новым условиям, переключаться между задачами и изменять мышление в ответ на изменения окружающей среды, развивается наиболее быстро в дошкольные годы, вместе с ростом нейронных сетей, вовлекающих префронтальную кору [11]. По данным исследований, когнитивная гибкость тесно связана с дивергентным мышлением, при котором человек, берясь за сложную задачу, создает не один, а множество вариантов решения.

Существует большое количество тестов на дивергентное мышление, но они, в большинстве своем, ориентированы на оценку креативности взрослых людей и детей с 5 лет. До некоторых пор не было невербальных тестов для оценки дивергентного мышления детей раннего возраста с двух лет. В 2013 году команда английских ученых предло-

жила невербальный неимитационный тест «Необычная коробка» для оценки дивергентного мышления детей с двух лет [5]. Данный тест применялся в исследовании научного коллектива из Японии, которое было направлено на изучение взаимосвязи когнитивной гибкости и дивергентного мышления детей (выборка: 22 ребенка, средний возраст 50 месяцев и 9 дней). В результате эксперимента не было обнаружено значимой корреляции между когнитивной гибкостью детей и дивергентным мышлением. Однако анализ fNIRS показал, что активация головного мозга детей в латеральных префронтальных областях была значительно выше во время тестовых фаз «Необычной коробки». Кроме того, дети, которые сильно задействовали свои вентролатеральные префронтальные области во время смены фаз теста на когнитивную гибкость (DCCS), задействовали те же самые области во время выполнения теста «Необычная коробка». В совокупности эти данные свидетельствуют о том, что дети задействуют свои латеральные префронтальные области при дивергентном мышлении, и что дивергентное мышление может частично поддерживаться когнитивной гибкостью в раннем детстве [8].

Мы решили исследовать взаимосвязь дивергентного мышления и когнитивной гибкости детей с двух лет. Для этого мы использовали тест «Необычная коробка» (Unusual box test) [5] и тест на когнитивную гибкость «Сортировка карточек по изменяемому признаку» (DCCS), проводились фазы до переключения (по цвету) и после переключения (по форме) [12]. В нашем пилотном исследовании приняли участие десять дошкольников (5 мальчиков и 5 девочек), средний возраст 33 месяца и 22 дня; диапазон 24 месяца и 4 дня – 39 месяцев 7 дней. Два ребенка были исключены, так как не смогли до конца выполнить тесты. Перед привлечением детей к участию в исследовании были получены информированные согласия родителей.

Тест «Необычная коробка» включает в себя красочную деревянную коробку (33,5×18×14,2 см) необычной конструкции с выступами, веревочками, кольцами, отверстиями, внутренним пространством и лесенкой (рис. 1). В нашем эксперименте коробка устанавливалась на маленький стол, вокруг которого ребенок мог спокойно передвигаться и доставать до коробки с любой стороны. Кроме того, использовались пять предметов, которые являлись совершенно новыми, неизвестными для испытуемых: спиралевидная подставка для яиц, металлическая пластина с двумя присосками, валик из ниток, резиновая игрушка-головоломка для собак Kong и крючок (рис. 1).



Рис. 1. Необычная коробка и пять предметов

В начале эксперимента ребенку дается время на изучение коробки, а затем выдается по одному из пяти предметов в хаотичном порядке и говорится, что он может играть с ним и с коробкой вместе, пока экспериментатор не скажет ему остановиться. Каждый из перечисленных выше предметов выдается на 90 секунд. Все действия детей, которые они совершали с коробкой и предметами, записывались на видео. Ребенку не задавалось никаких конкретных вопросов, кроме инструкции поиграть с игрушками. Действия, которые ребенок совершал с помощью игрушек и коробки, впоследствии кодировались и оценивались в соответствии с критериями: беглость – количество различных действий, которые ребенок выполнил за все попытки (5×90 секунд); оригинальность – сумма баллов за оригинальность каждого действия. (3б – действия, которые выполняли менее 5 % всех детей; 2б – действия, выполняемые 5–20 % детей; 1б – действия, выполненные 20–50 % детей, получили 1 балл; 0б – действия, выполненные более чем 50 % детей), затем рассчитывался итоговый показатель: общий балл оригинальности/беглость.

Анализ данных показал сильную корреляционную связь между итоговым значением дивергентного мышления (беглость/оригинальность) и прохождением фазы после переключения (сортировка по форме) (коэф. Спирмана $r = 0,917$,

$p < 0,001$). На данной малочисленной выборке получилось, что оригинальность поддерживается беглостью (коэф. Спирмана $r = 0,893$, $p = 0,001$).

Кроме того, высоко коррелирует с показателями дивергентного мышления то, сопровождал ли ребенок речь свои действия с предметами и коробкой или речь отсутствовала (коэф. Спирмана $r = 0,720$, $p = 0,022$).

В связи с малочисленностью выборки мы не можем уверенно говорить о том, что когнитивная гибкость поддерживает дивергентное мышление у детей раннего возраста, но мы видим такую тенденцию, кроме того, в очередной раз мы наблюдаем подтверждение теории Л.С. Выготского о связи речи и мышления. Исследование требует дальнейшего проведения на большей выборке.

Литература

1. Разумникова О.Р., Николаева Е.И. Онтогенез тормозного контроля когнитивных функций и поведения. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. 159 с.
2. Crair M.C., Gillespie D.C., Stryker M.P. The role of visual experience in the development of columns in cat visual cortex // *Science*. 1998. 279(5350). 566–70.
3. Hartley C.A. How do natural environments shape adaptive cognition across the lifespan? // *Trends Cogn. Sci.* 2022. 26(12). 1029–30.
4. Hensch T.K. Critical period plasticity in local cortical circuits // *Nat. Rev. Neurosci.* 2005. 6(11):877–88.
5. Hoicka E. et al. The Unusual Box Test: A Non-Verbal, Non-Representational Divergent Thinking Test for Toddlers Carberry // *AAAI Spring Symposium: Creativity and (Early) Cognitive Development*, 2013.
6. Lenneberg E.H. The biological foundations of language // *Hosp. Pract.* 1967, 2(12). 59–67.
7. Pascual-Leone A. Reorganization of cortical motor outputs in the acquisition of new motor skills. *Recent Advances in Clinical Neurophysiology Amsterdam* // Elsevier Sci. 1996. P. 304–308.
8. Wang J. et al. The neurobehavioral relationship between executive function and creativity during early childhood // *Developmental Psychobiology*. 2021. V. 63.
9. Werker J.F., Hensch T.K. Critical periods in speech perception: new directions // *Annu. Rev. Psychol.* 2015. 66:173–96.
10. Yeung M.S.Y. et al. Dynamics of oligodendrocyte generation and myelination in the human brain // *Cell*. 2014. 159(4). 766–74.
11. Zelazo P.D. Executive function: Reflection, iterative reprocessing, complexity, and the developing brain // *Developmental Review*. 2015.
12. Zelazo P.D. The Dimensional Change Card Sort: A method of assessing executive function in children // *Nature Protocols*. 2006. 1, 297–301.

Модель многозадачных режимов в случае выбора языковой альтернативы: связь с моделью Абрамса – Строгатца и интерпретация языковой волатильности

А.А. Головина, А.В. Медведев, О.А. Кузенков

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
alinagolovina_88@mail.ru, a.medvedev.unn@gmail.com, oleg.kuzenkov@itmm.unn.ru

Актуальность

Исследование связи между моделью многозадачных режимов [1] и классической моделью языковой динамики Абрамса – Строгатца [2] представляет собой важный вклад в междисциплинарное изучение языковой динамики, объединяющее математическое моделирование, лингвистику и когнитивные науки. Обе модели описывают конкуренцию языков, но с различных точек зрения: индивидуального уровня (модель многозадачных режимов) и популяционного (модель Абрамса – Строгатца).

Настоящая работа устанавливает формальную связь между этими подходами и исследует параметр волатильности β , обеспечивающий баланс между сохранением языков и их исчезновением.

1. Модель многозадачных режимов

Базовая формулировка.

Модель многозадачных режимов описывает динамику словарного запаса индивида:

$$\begin{cases} \dot{k}_1 = Y_1(t)(-k_1\tau_1 + F_0(\gamma_{11}k_1 - \gamma_{12}k_2 - T_1)), \\ \dot{k}_2 = Y_2(t)(-k_2\tau_2 + F_0(\gamma_{22}k_2 - \gamma_{21}k_1 - T_2)), \end{cases} \quad (1)$$

где

k_1, k_2 – средний запас слов первого или второго языков у индивида;

$Y_1(t), Y_2(t)$ – вероятности выбора соответствующего языка в момент времени t ;

γ_{ij} – коэффициенты самоусиления ($i = j$) и интерференции ($i \neq j$) словарного запаса;

$T_{1,2}$ – минимальный словарный запас для базового взаимодействия;

τ_1, τ_2 – коэффициенты забывания или снижения словарного запаса;

F_0 – параметр готовности сообщества к использованию языка.

Средний запас слов в сообществе:

$$z_{1,2} = \frac{\sum_{i=1}^N k_{1,2}^i}{N}, \quad (2)$$

где N – число индивидов.

Значения $z_{1,2}$ можно интерпретировать как доли пользователей языков или интенсивность их использования в обществе.

2. Модель Абрамса – Строгатца

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = s_1 z_2 (z_1)^\alpha - s_2 z_1 (z_2)^\alpha, \\ \dot{z}_2 = -\dot{z}_1. \end{cases} \quad (3)$$

При ограничениях:

$$s_1 + s_2 = 1, z_1 + z_2 = 1,$$

где:

α – параметр волатильности,

$s_{1,2}$ – престижность первого и второго языков.

3. Установление связи между моделями

Введем в модель (3) следующую замену: $\beta = \alpha - 1$.

При малых β выполним разложение:

$$(z_i)^\alpha = z_i(z_i)^\beta, (z_i)^\beta \approx 1 + \beta(z_i - 1). \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получаем приближенную форму:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = s_1 z_1 z_2 (-2\beta + 2 + \beta z_1 + \beta z_2 - \frac{1-\beta+\beta z_2}{s_1}), \\ \dot{z}_2 = s_2 z_1 z_2 (-2\beta + 2 + \beta z_2 + \beta z_1 - \frac{1-\beta+\beta z_1}{s_2}). \end{cases} \quad (5)$$

При этом устанавливается соответствие параметров:

$$s_i z_1 z_2 \leftrightarrow Y_i(t), T_{1,2} \leftrightarrow \frac{1-\beta+\beta z_{2,1}}{s_{1,2}}, \gamma_{ij} \leftrightarrow \beta, F_0 \equiv 1.$$

Предполагается, что члены сообщества готовы к использованию языка.

4. Динамические режимы

Обе модели демонстрируют

- три равновесных состояния: два устойчивых (языковая монополия) и одно неустойчивое (критическая точка);
- разнообразие динамических режимов – от периодических колебаний до сложных, вплоть до хаотических динамик, обусловленных нелинейностью взаимодействий.

5. Интерпретация параметра волатильности α

Фундаментальная константа $\alpha \approx 1,3$ обеспечивает баланс между сохранением языков и их вымиранием [3].

- Высокие значения ($\alpha > 1$) ведут к языковой монополии – доминированию одного языка и вытеснению остальных.
- Низкие значения ($\alpha \approx 1 - 0$) приводят к языковой гиперфрагментации – появлению множества малых языков и диалектов, что снижает взаимопонятность и устойчивость языковой системы.

Когнитивно-биологические ограничения, которые отражает параметр α :

- Эволюционный компромисс между изучением нового языка и сохранением известного.
- Социальные ограничения, такие как «число Данбара» – максимальное количество стабильных социальных связей, которое человек способен поддерживать.

6. Гипотезы

Гипотеза № 1

Параметр β – как фундаментальная константа языковой экологии, представляющая эволюционно оптимальное значение.

В прошлом, когда человечество было расселено по географическим регионам с ограниченными контактами, параметр β мог варьироваться:

- При значениях β от 0,8 до 1,0 наблюдалась бы языковая монополия: ускоренное исчезновение малых языков, доминирование одного или нескольких крупных языков и сильная тенденция к культурной унификации. История могла бы характеризоваться быстрыми сменами доминирующих языков.
- При $\beta > 1$ языковая динамика была бы неустойчивой с резкими колебаниями популярности языков: первый достигший критической массы язык полностью вытеснял бы остальные, делая многоязычие практически невозможным. Языковые «моды» приводили бы к резкой смене языков у сообществ.
- При $\beta \approx 0$ мир был бы охвачен гиперфрагментацией языков – десятки тысяч языков с низкой взаимопонятностью, серьезные препятствия для масштабного сотрудничества, высокая культурная диверсификация, но низкая интеграция.

С течением времени данные процессы трансформировались, и современное значение $\beta \approx 0,3$ представляет собой «золотую середину», обеспечивающую поддержание языкового разнообразия без чрезмерной фрагментации, существование крупных языков без полного доминирования одного, а также создание условий для устойчивого многоязычия и межкультурного диалога.

Гипотеза № 2

Параметр β определяется биологическими, социальными, когнитивными и культурными особенностями человека.

Человеческий мозг эволюционировал, чтобы балансировать между способностью быстро усваивать новое и сохранять уже изученное. Значение

$\beta \approx 0,3$ отражает этот компромисс: достаточно низкое, чтобы обеспечить устойчивость языковых знаний, и одновременно достаточно высокое, чтобы допускать адаптацию к изменяющейся языковой среде.

- Согласно Закону Меткалфа, полезность социальных взаимодействий растет пропорционально квадрату числа участников, что может отражать информационную избыточность при изучении новых языков. Владение языком можно рассматривать как частный случай доступа в социальную сеть.
- Когнитивные ограничения: $\beta \approx 0,3$ может отражать фундаментальные закономерности нейронных связей в человеческом мозге при обработке и освоении языка, учитывая логарифмическую кривую обучения и модель приобретения навыков.
- Значение β может быть связано с когнитивно-биологическими пределами, совпадающими с известными ограничениями на размер устойчивых социальных групп (число Данбара), и с распределением активности в социальных сетях.

Выводы

1. Параметр β выступает фундаментальной характеристикой языковой динамики, объединяя когнитивные, биологические и социальные аспекты.
2. Модель многозадачных режимов и классическая модель Абрамса – Строгатца взаимодействуют друг друга, описывая динамику языков с индивидуального и популяционного уровней.
3. Современное значение $\beta \approx 0,3$ представляет собой оптимальный баланс, который позволяет сохранить языковое разнообразие, избегая как монополии, так и гиперфрагментации.
4. Понимание и количественное моделирование параметра β важно для разработки языковой политики, прогнозирования языковых изменений и образовательных стратегий.

Литература

1. Головина А.А., Яхно В.Г. Упрощенные модели для описания многозадачных режимов в живых распознающих системах // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, вып. 3. С. 361–380. DOI: 10.18500/0869-6632-003148, EDN: CMDASL.
2. Abrams D., Strogatz S. Modelling the Dynamics of Language Death // Nature. 2003. V. 424. P. 900.
3. Dunbar R. Neocortex size as a constraint on group size in primates // Journal of Human Evolution. 1992.

Динамика фрактальной размерности суммарной электрической активности в процессе обучения человека и нейросетевых моделей

И.А. Горбунов

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

Вопрос о соотношении уровня физиологической активации субъекта и его энергозатрат с успешностью выполняемой им интеллектуальной задачи остается одним из наиболее актуальных в современной психофизиологии (Чепя М.-Л.А., 1990, Neubauer A.C. et al., 2004, Freeman W.J., 2015, Friston K., 2010). Изучение информационно-энергетических характеристик интеллектуальной деятельности проводилось нами на различных видах мышления и понятийных преобразований. В исследовании (Холодная М.А. и др., 2013) было обнаружено, что при мысленном обобщении трех слов одним понятием, решении метаграмм, продумывании аргументации противоположных суждений мощности ЭЭГ в диапазонах основных ритмов имеют тенденцию к увеличению в низкочастотной области (Δ , Θ и α -ритмов) и снижению в высокочастотной (β_1 , β_2 и γ -ритмов) к концу решения, что может быть связано с повышением фрактальной размерности сигнала.

При осознании смысла читаемого или прослушиваемого текста, постепенно проявляющегося на экране (Ткачева и др., 2015) фрактальная размерность, вычисляемая как тангенс угла падения амплитудно-частотной характеристики в двойном логарифмическом масштабе также снижается к моменту принятия решения об отнесении текста к одному из четырех типов сюжета. В исследовании (Gorbunov I. & Morozova S., 2021) в задаче соотнесения содержания графика и одной из трех таблиц, отражающих значения, выраженные на нем, также наблюдается соответствующая динамика снижения фрактальной размерности от начала к концу процесса решения. При этом в нескольких случаях наблюдается резкий всплеск фрактальной размерности вначале и плавное снижение к концу решения (рис. 1).

В исследовании (Горбунов И.А. & Куприкова М.В., 2023) наблюдается зависимость фрактальной размерности ЭЭГ при прослушивании устных вопросов от лингвистических характеристик вопросов, интеллекта испытуемого и других его психологических характеристик.

Обычно динамика изменения фрактальной размерности характеризовалась начальным всплеском на первых этапах решения (порядка 10–20 % времени решения), а затем более или менее плавного смещения уровня фрактальной размерности вниз, до уровня более низкого, чем даже на первом этапе. Эта динамика повторяется достаточно стабильно как во множестве репликаций одного задания, так и в дизайнах с различным типом задач.

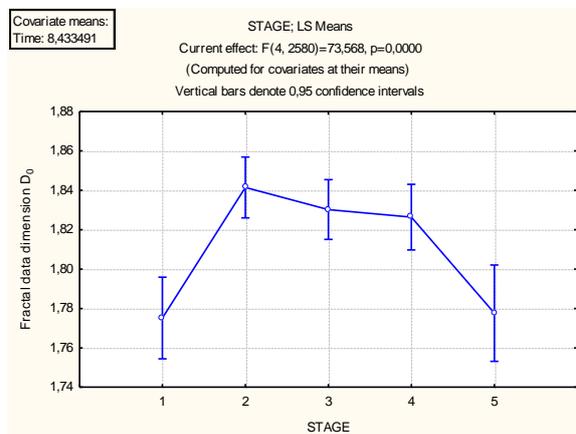


Рис. 1. Динамика фрактальной размерности ЭЭГ при решении задачи по поиску таблицы, значения которой соответствуют графику. Stage – этап решения

Также можно отметить, что снижение фрактальной размерности при решении задач коррелирует с правильностью ответа и общей способностью человека к решению задач данного типа (Gorbunov I. & Morozova S., 2021, Холодная М.А. и др., 2013, Shcherbakova O.V. et al., 2014). Учитывая устойчивый характер данной закономерности и универсальность эффекта для различных типов задач, мы провели моделирование данного эффекта на динамике обучения нейросетевой модели выполнению тех или иных когнитивных задач по распознаванию образов различной сложности.

Первая модель обучалась распознавать простой числовой паттерн из 2 переменных подаваемых на ее вход в виде активации входных нейронов в диапазоне от -1 до 1 . Целевая функция носила синусоидальный характер с дальнейшим разделением на два состояния, 0 или 1:

$$Y = \begin{cases} k_1 * \sin(X_1) + k_2 * \cos(X_2) \geq 0.5 \Rightarrow 1 \\ k_1 * \sin(X_1) + k_2 * \cos(X_2) < 0.5 \Rightarrow 0, \end{cases}$$

где k_1 , k_2 – константы, X_1 , X_2 – входные паттерны, Y – целевой паттерн для обучения.

Сигналом для вычисления фрактальной размерности (Higuchi T., 1988) нейронной динамики нейросети (аналог ЭЭГ) была последовательность сумм активаций всех нейронов сети на каждом этапе активации нейронной сети. Для исследования динамики изменений фрактальной размерности выбирался отрезок от начала до устойчивого снижения ошибки менее 1 % ошибочных ответов.

В результате зафиксирована динамика изменений фрактальной размерности нейросети с коротким начальным всплеском, а затем плавным

снижением до минимальных значений порядка 1,1 (фрактальная размерность сигнала варьирует от 1,0 до 2,0). Для проверки стабильности эффекта на данном стимульном материале обучались 60 нейронных сетей, инициализированных случайными наборами параметров.

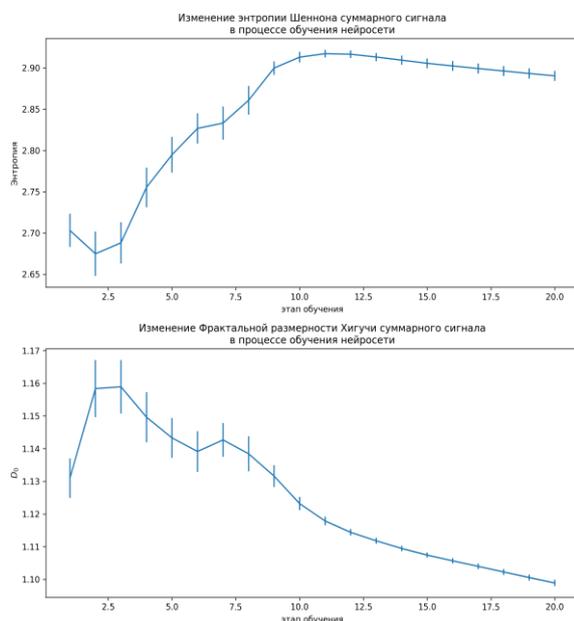


Рис. 2. Усредненная динамика изменения энтропии и фрактальной размерности сигнала (суммарной активации) нейронных сетей при обучении

На нижнем графике (рис. 2) приведены средние и 95 % доверительные интервалы фрактальной размерности D_0 , вычисленной по алгоритму Хигучи для выборки из результатов по всем 60 моделям. Также вычислялась динамика энтропии Шеннона, приведенная на верхнем графике.

Более сложная и приближенная к реальным экспериментальным задачам модель решала задачу, сходную с сопоставлением графиков и таблиц в эксперименте (Gorbunov I. & Morozova S., 2021). Модель была реализована Чукановым А.В. под научным руководством Горбунова И.А. (Чуканов А.В., 2025). Она сопоставляла подаваемый на один вход график, отображающий численные значения, хранящиеся в одной из трех таблиц, предъявляемых для выбора на другой вход нейронной сети. Правильным ответом на выходе был номер таблицы, численные значения которой отображает график. В качестве модели была взята сверточная нейросеть, решающая задачу сопоставления графика и таблиц. Из 33 стимулов были автоматически извлечены области графиков и таблиц. Каждое изображение содержало один график и три таблицы. Изображения были предварительно размечены: каждому графику соответствовала одна правильная таблица (метка от 0 до 2). Полученный массив был организован в виде структуры: graph – изображение графика; tables – список из трех изображений таблиц; label – индекс правильной таблицы.

В основе модели лежит сверточный энкодер ResNet18, предварительно инициализированный и

использованный для извлечения признаков. Архитектура сети состоит из двух потоков: первый модуль обрабатывает график, второй – три таблицы одновременно. Оба потока пропускаются через ResNetEncoder, состоящий из структуры модели ResNet18 и одного обучаемого линейного слоя с выходной размерностью 128. После получения признаков от графика и таблиц производится нормализация и вычисляется сходство между графиком и каждой из таблиц. Сеть решает задачу классификации из трех классов, выбирая наиболее похожую таблицу на основе сходства признаков.

Модель обучалась с использованием функции потерь CrossEntropyLoss и оптимизатора Adam со скоростью обучения $1e-4$. Данные были разбиты на обучающую и валидационную выборки (80/20). В процессе обучения оценивалась точность на валидационной выборке. Метрикой качества служила доля правильных предсказаний. Была произведена оценка фрактальной размерности скрытых состояний модели в процессе обучения. Расчет осуществлялся для ряда активаций энкодера (ResNetEncoder) на валидационных данных после каждой эпохи обучения.

В результате получена динамика постепенного убывания фрактальной размерности нейронной сети от 1 до 30 эпохи обучения от величины 1,95 до 1,4 со стабилизацией минимальных значений приблизительно на 15 эпохе (рис. 3).

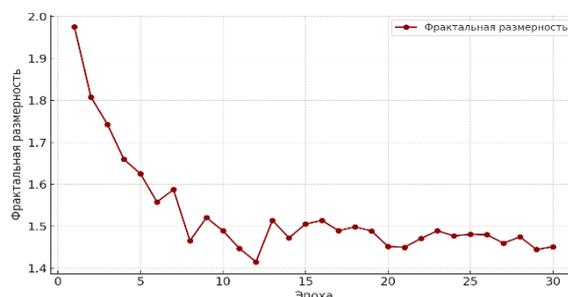


Рис. 3. Динамика изменения фрактальной размерности сигнала от нейронной сети, распознающей графики и таблицы

Полученные результаты говорят о наличии универсальных механизмов регуляции системных информационно-энергетических процессов, протекающих в головном мозге и в нейронной сети в процессе научения решению когнитивных задач.

Литература

1. Горбунов И.А. & Куприкова М.В. Факторы когнитивной сложности тестовых вопросов в психофизиологических исследованиях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Психология. 2023. 13(2), 244–260.
2. Ткачева Л.О., Горбунов И.А., Наследов А.Д. Реорганизация системной деятельности мозга по мере осознания смысла визуально предъявляемых текстов с возрастающей полнотой информации // Физиология человека. 2015. Т. 41, № 1. С. 17–28.
3. Холодная М.А., Щербакова О.В., Горбунов И.А., Голованова И.В. & Паповян М.И. Информационно-энергетические характеристики различных типов когнитивной деятельности // Психологический журнал. 2013. 34(5), 96–107.

4. *Чена М.-Л.А.* Взаимосвязь информационных и энергетических характеристик познавательных процессов в деятельности человека: Автореф. дисс. ... канд. психол. наук. Киев, 1990.
5. *Чуканов А.В.* Моделирование динамики изменения функционального состояния мозга в процессе мышления: ВКР. Магистратура, факультет психологии. С-Пб.: СПбГУ, 2025.
6. *Freeman W.J.* Thermodynamics of cerebral cortex assayed by measures of mass action // *Chaos, information processing and paradoxical games: The Legacy of John S. Nicolis*. 2015. P. 277–300.
7. *Friston K.* The free-energy principle: a unified brain theory? // *Nature reviews neuroscience*. 2010. V. 11, no. 2. P. 127–138.
8. *Gorbunov I. & Morozova S.* Fractal Dimension EEG Dynamics in Solving Task Recognition of Bar Plots // *International Journal of Psychophysiology*. 2021. 168. S138-S139.
9. *Higuchi T.* Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1988. 31(2), 277–283.
10. *Neubauer A.C., Grabner R.H., Freudenthaler H.H., Beckmann J.F., Gütke J.* Intelligence and individual differences in becoming neurally efficient // *Acta Psychologica*. 2004 (116). P. 55–74.
11. *Shcherbakova O.V. et al.* The neural efficiency hypothesis: Further evidence from the EEG study of conceptual thinking // *International Journal of Psychophysiology*. 2014. V. 2, no. 94. P. 218.

Построение полной бифуркационной картины нелинейных уравнений в частных производных

В.А. Громов, К.К. Томащук

НИУ «Высшая школа экономики», Москва;
stroller@rambler.ru;

korneytomashchuk@yandex.ru

Для решения множества задач в естественных науках возникает необходимость построения полной бифуркационной картины, охватывающей первичные, вторичные, третичные и последующие ветви решений, для краевых задач систем нелинейных уравнений в частных производных. В частности, системы, описывающие взаимодействие большого числа элементарных частиц в рамках формализма неравновесной статистической механики, к которым безусловно относятся процессы в головном мозге высших млекопитающих, хорошо описываются нелинейными уравнениями в частных производных типа Фоккера – Планка. Несмотря на существование достаточного числа эффективных подходов решения таких задач (например, метод конечных элементов, метод конечных разностей), задача создания метода описания полной бифуркационной картины до сих пор остается открытой. Кроме того, существует значительный разрыв между глубокой теорией бифуркаций и катастроф и практическими методами, позволяющими не только строить бифуркационную картину для нелинейных уравнений в частных производных, но и корректно интерпретировать её в рамках этих теорий. Предлагаемый в работе метод развивает подход Н.И. Ободан и В.А. Громова [1] и обеспечивает восстановление полной бифуркационной структуры для широкого класса вариационных краевых задач. В основе метода лежит обобщенное представление неизвестных функций, основанное на теореме Колмогорова – Арнольда, что создает новые возможности для анализа сложных нелинейных систем.

Предложенный в работе Н.И. Ободан и В.А. Громова [1] итерационный обобщенный метод Канторовича (ИОМК) основывается на представлении вида

$$u(x_1, x_2) \approx \sum_i h_i(x_1)g_i(x_2).$$

Подстановка данного представления в функционал устраняет многомерную неизвестную функцию, заменяя ее набором одномерных функций $h_i(x_1), g_i(x_2)$. Эти функции определяются в ходе итерационного процесса. В результате задача бифуркационного анализа краевых задач для нелинейных уравнений в частных производных сводится к аналогичной задаче для нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Ключевое преимущество подхода – формирование адаптивного базиса, оптимально подстроенного

под конкретную задачу: вместо фиксированной системы функций (как в методе Фурье) базис конструируется исходя из ее специфики. Это обеспечивает компактность разложения по методу ИОМК – часто достаточно всего двух-трех компонент, что выгодно отличается от классических подходов, требующих длинных рядов. Важно, что такая компактность отражает естественную структуру решений во многих случаях, подтверждая практическую эффективность метода.

Однако представление, используемое в ИОМК, не является общим представлением функции многих переменных в виде функции одной переменной. Наиболее общее представление дается теоремой Колмогорова – Арнольда. В нашей работе данная теорема была рассмотрена в трех ее формулировках: Шпрехера [2], Хебдерга [3] и Досса [4] соответственно:

$$u(x_1, \dots, x_n) = \sum_{q=0}^{2n} \varphi_q \left(\sum_{p=1}^n \alpha_p \psi(x_p + qa) \right),$$

$$u(x_1, \dots, x_n) = \sum_{q=0}^{2n} \varphi \left(\sum_{p=1}^n \lambda_p \psi(x_p) \right),$$

$$u(x_1, \dots, x_n) = \sum_{q=0}^{2n} \varphi \left(\prod_{p=1}^n \psi_{q,p}(x_p) \right).$$

Применение данных представлений позволяет также редуцировать задачу бифуркационного анализа краевых задач для уравнений в частных производных к уже решенной задаче анализа краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений.

На основе разработанных подходов была построена полная бифуркационная картина для двумерной задачи Брату и нелинейных уравнений Кармана, включая ветви вторичного и третичного ветвления. Полученные результаты демонстрируют хорошее соответствие с предсказаниями теории особенностей дифференцируемых отображений: совпадают порядок вырождения особых точек, допустимые сценарии изменения числа экстремумов (максимумов и минимумов) потенциальной функции при пересечении бифуркационного множества в пространстве параметров и другие характеристики.

Литература

1. *Obodan N.I., Lebedeyev O.G., Gromov V.A.* Nonlinear behaviour and stability of thin-walled shells. Springer Science & Business Media, 2014. V. 199.
2. *Sprecher D.A.* A numerical implementation of Kolmogorov's superpositions // *Neural networks*. 1996. V. 9, no. 5. P. 765–772.
3. *Shapiro H.S.* Topics in approximation theory. Springer, 2006. V. 187.
4. *Doss R.* Representations of continuous functions of several variables // *American Journal of Mathematics*. 1976. V. 98, no. 2. P. 375–383.
5. *Громов В.А., Томащук К.К., Бесчастнов Ю.Н., Сидоренко А.А., Какурин В.В.* Метод построения полной бифуркационной картины краевой задачи для нелинейных уравнений в частных производных: применение теоремы Колмогорова – Арнольда // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2025. Т. 31, № 1.

Алгоритм для распознавания эпилептических припадков у крыс на основе анализа временно-частотных характеристик

А.С. Джафарова^{1,3}, А.А. Грищенко^{1,3}, Е.М. Сулейманова², М.В. Корнилов¹

¹Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского;
dzhafarovaan@gmail.com

²Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

³Санкт-Петербургский государственный университет Петра Великого

Лимбическая эпилепсия, характеризующаяся патологической активностью височной доли мозга, представляет значительные сложности для диагностики из-за высокой варибельности эпилептических разрядов [1]. Традиционные методы анализа электроэнцефалограмм (ЭЭГ) часто требуют трудоемкого визуального анализа, что делает актуальной разработку автоматизированных алгоритмов распознавания припадков на основе эффективных параметров сигнала.

В данном исследовании предложен новый алгоритм для детекции эпилептических приступов у крыс линии Wistar с пилокарпин-индуцированной эпилепсией [2], основанный на анализе временно-частотных характеристик ЭЭГ. Метод позволяет автоматически выделять патологические паттерны, используя комбинацию частотного и временного анализа, что повышает точность идентификации припадков по сравнению с традиционными подходами. В работе использованы 72 многоканальные записи ЭЭГ общей продолжительностью 4–6 часов, полученные от 8 животных, при этом достоверные эпилептические приступы наблюдались в 24 случаях.

Перед проведением анализа все сигналы ЭЭГ подвергались тщательной предварительной обработке. Это включало удаление артефактов с помощью полосовой фильтрации в диапазоне 0,5–100 Гц, подавление сетевых наводок с использованием режекторного фильтра 50 Гц, а также нормировку амплитуд сигналов для обеспечения сопоставимости данных [3, 4]. Особое внимание уделялось сохранению полезного сигнала при устранении артефактов.

В основе разработанного алгоритма лежит метод вейвлет-анализа с использованием материнского вейвлета «мексиканская шляпа», который представляет собой второй производный гауссов импульс [5] и обладает компактной временной локализацией, что делает его высокоэффективным для анализа высокочастотных компонент сигналов, таких как эпилептические спайки в ЭЭГ [6]. Благодаря симметричной форме с выраженным центральным пиком и затухающими осцилляциями он усиливает резкие переходы и кратковременные события, позволяя детектировать патологические паттерны на фоне шума [7]. Его применение во временно-частотном анализе обеспечивает точное выделение моментов возникновения припадков в результате адаптивного масштабирования по частоте и устойчивости к низкочастотным артефактам. Этот метод был выбран благода-

ря его исключительной эффективности при работе с нестационарными сигналами, характерными для эпилептической активности. В отличие от традиционных методов спектрального анализа, вейвлет-преобразование позволяет одновременно исследовать временные и частотные характеристики сигнала, что особенно важно для точной идентификации эпилептических разрядов.

Математически вейвлет-функция «мексиканская шляпа» описывается формулой

$$\psi(t) = (1 - t^2)e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (1)$$

Здесь t представляет временную переменную, e – основание натурального логарифма, а $\psi(t)$ определяет значение вейвлет-функции в конкретный момент времени. Эта функция является второй производной гауссова распределения и обладает уникальной способностью точно выделять резкие изменения сигнала, что наглядно демонстрирует рис. 1. Форма данного вейвлета оптимально соответствует характерным паттернам эпилептических разрядов, обеспечивая высокую точность их детекции.

Собственно анализ проводился с применением непрерывного вейвлет-преобразования [8], которое математически выражается через интеграл:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (2)$$

В этой формуле a представляет параметр масштаба, связанный с частотными характеристиками сигнала, b – параметр временного сдвига, $x(t)$ – исходный сигнал ЭЭГ, а ψ обозначает комплексно-сопряженную вейвлет-функцию, которая в данной работе была представлена «мексиканской шляпой». Анализ проводился в частотном диапазоне 1–40 Гц, который наиболее информативен для выявления эпилептической активности.

Для количественной оценки эффективности разработанного алгоритма использовались стандартные метрики чувствительности

$$Se = \frac{Tp}{Tp+Fn} \quad (3)$$

и специфичности:

$$Sp = \frac{Tn}{Tn+Fp}, \quad (4)$$

где Tp обозначает истинно положительные срабатывания, Fp – ложные срабатывания, Tn – истинно отрицательные результаты, а Fn – пропущенные события. Эти показатели [9] рассчитывались путем сравнения автоматически обнаруженных событий с экспертной разметкой.

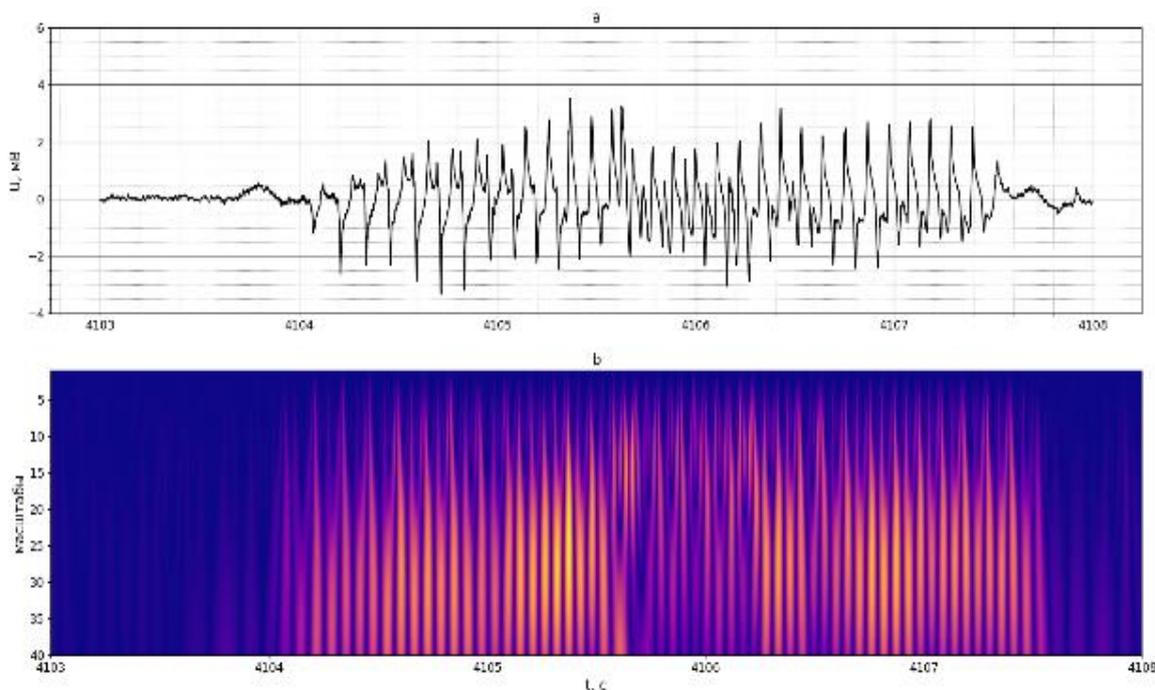


Рис. 1. Временной ряд сигнала левого гиппокампа (a), b – вейвлет скалограмма. По оси абсцисс отложено время (секунды), по оси ординат – частота (Гц), цветовая шкала отражает энергию сигнала в логарифмическом масштабе

Полученные значения чувствительности на уровне 75–95 % свидетельствуют о хорошей способности алгоритма выявлять истинные эпилептические разряды. При этом специфичность метода в диапазоне 60–70 % показывает его достаточную эффективность в исключении ложноположительных срабатываний. Такие показатели точности особенно значимы для исследований лимбической эпилепсии, где традиционные методы анализа часто демонстрируют более низкую эффективность из-за сложной природы исследуемых сигналов [10, 11]. Сравнение с результатами визуального анализа экспертов подтвердило надежность алгоритма и его применимость как для экспериментальных, так и для потенциальных клинических исследований.

Применение вейвлет-анализа с функцией «мексиканская шляпа» позволило успешно идентифицировать эпилептические разряды в записях ЭЭГ, полученных от крыс с пилокарпин-индуцированной эпилепсией. Алгоритм продемонстрировал особую эффективность при анализе сложных паттернов лимбической эпилепсии, где традиционные методы фурье-анализа оказывались недостаточно информативными. Важно отметить, что метод показал стабильную работу даже при анализе длительных записей продолжительностью 6 часов, автоматически выявляя эпилептическую активность в трети всех исследованных случаев.

Разработанный алгоритм на основе вейвлет-анализа представляет собой эффективный инструмент для автоматического распознавания эпилептических припадков в экспериментальных исследованиях на животных. Метод сочетает в себе высокую чувствительность к характерным паттернам эпилептической активности с достаточной

специфичностью, что делает его перспективным для применения в нейрофизиологических исследованиях [12]. Полученные результаты открывают новые возможности для изучения механизмов лимбической эпилепсии и разработки более точных методов диагностики этого заболевания. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию параметров алгоритма и его адаптацию для работы с клиническими данными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 25-22-00406.

Литература

1. Shandra A.A., Godlevsky L.S. Pentylentetrazol-Induced Kindling as a Model of Absence and Convulsive forms of Epilepsy // *Advances in Behavioral Biology*. 2005. V. 55. P. 7–19.
2. Turski W.A., Cavalheiro E.A., Schwarz M., Czuczwar S.J., Kleinrok Z., Turski L. Limbic seizures produced by pilocarpine in rats: Behavioural, electroencephalographic and neuropathological study // *Behav. Brain Res.* 1983. V. 9, no. 3. P. 315–335.
3. Vinogradova L.V., Vinogradov V.Y., Kuznetsova G.D. Unilateral cortical spreading depression is an early marker of audiogenic kindling in awake rats // *Epilepsy Res.* 2006. V. 71, no. 1. P. 64–75.
4. Lüttjohann A., van Luijtelaaar G., Makarov V.V., Maksimenko V.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Methods of automated absence seizure detection, interference by stimulation, and possibilities for prediction in genetic absence models // *J. Neurosci. Methods*. 2015. V. 4, no. 3. P. 13–15.
5. Adeli H., Zhou Z., Dadmehr N. Analysis of EEG records in an epileptic patients using wavelet transform // *J. Neurosci. Methods*. 2003. V. 123. P. 69–87.
6. Blanko S., Quian-Quiroga R., Rosso O., Serrano E. Time-frequency analysis of electroencephalogram series.

III. Wavelet packets and information cost function // *Phys. Rev. E*. 1998. V. 57. P. 932–940.

7. *Bosnyakova D., Gabova A., Kuznetsova G. et al.* Time-frequency analysis of spike-wave discharges using the modified wavelet transform // *J. Neurosci. Methods*. 2006. V. 165. P. 80–85.

8. *Короновский А.А.* Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М. : Физматлит, 2003. С. 6–9.

9. *Ситникова Е.Ю., Короновский А.А., Храмов А.Е.* Анализ электрической активности головного мозга при абсанс-эпилепсии: прикладные аспекты нелинейной динамики // *Изв. вузов ПНД*. 2011. Т. 19, № 6. С. 173–182.

10. *Ершова А.С., Грищенко А.А., Сулейманова Е.М., Виноградова Л.В., Сысоев И.В.* Разработка метода авто-

матической разметки пик-волновых разрядов у крыс-фармакологических моделей абсансной эпилепсии // *Современная нейробиология: фундаментальные исследования и практические аспекты*. 2022. С. 111–117.

11. *Mormann F., Andrzejak R.G., Kraskov A., Lehnertz K., Grassberger P.* Measuring synchronization in coupled model systems: A comparison of different approaches // *Physica D*. 2007. V. 225. P. 29–42.

12. *Ершова А.С., Сулейманова Е.М., Грищенко А.А., Виноградова Л.В., Сысоев И.В.* Межполушарная симметрия и асимметрия пик-волновых разрядов абсансного типа, вызванных системным введением пентилентетразола // *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2023. Т. 109, № 2. С. 241–251.

Пластичность рабочей памяти у детей с опытом институционализации

Е.А. Дыденкова, А.Н. Славинская

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

Введение

Невозможность воспитания ребенка биологическими родителями часто приводит к выраженному травматическому опыту институционализации (Lund et al., 2020), которая подразумевает психосоциальную депривацию в результате проживания в закрытых детских учреждениях. В настоящее время существует консенсус относительно негативного влияния институционализации на развитие ребенка, сформированный на основе понимания последствий, изложенных в теории привязанности (Bowlby, 1951), концепции сенситивных периодов в раннем онтогенезе (Walasek et al., 2024) и анализа последствий стрессовых событий для детей (Gunnar et al., 2007). Концепция сенситивных периодов описывает влияния, которые регулируют формирование определенной функции в определенный период времени и определяют конечный результат развития этой функции (Nelson et al., 2020). В рамках нейробиологического подхода концепция критических периодов надежно связана с понятием пластичности мозга, поскольку пластичная сущность заключается в способности нервной системы изменять себя, функционально и структурно, в ответ на внешнее воздействие. Поскольку в первые несколько лет жизни мозг ребенка крайне быстро растет и подвергается интенсивной миелинизации, нейрогенезу, синаптогенезу и прунингу, влияние окружающей среды в этот период может предопределять какие синапсы и нейронные сети сохраняются, а какие устраняются, по сути определяя будущие области мозговой активности и характер будущей коннективности. Ранний продолжительный стресс может повлиять на нервную пластичность, например, через изменение функционирования гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы организма, что выражается чрезмерной или недостаточной реакцией на стресс (Nikolaeva et al., 2024). Другой путь влияния на нейропластичность реализуется через нарушение процесса миелинизации. В исследовании, которое прошло на базе дома малютки, у 29 институционализированных младенцев было выявлено метилирование гена, необходимое для организации миелинизированных аксонов во время развития мозга. Интенсивность метилирования коррелировала с длительностью пребывания в детском доме (Naumova et al., 2019).

Поскольку опыт психосоциальной депривации приводит к нарушениям в развитии префронтальной коры, дефицит когнитивных функций ребенка является одним из наиболее трудно восстанавливаемых (Wade et al., 2019). Здесь мы фокусируемся на исполнительных функциях (тормозный контроль и рабочая память), которые относятся к се-

мейству нисходящих ментальных процессов, необходимых для изменения шаблонного, привычного поведения на новое, которое соответствует новым обстоятельствам (Diamond, 2013). Учитывая, что формирование исполнительных функций связано с развитием префронтальной коры и, следовательно, является долгосрочным и нелинейным процессом (Friedman et al., 2022), это также указывает на большое окно, открытое как для положительных, так и для отрицательных влияний окружающей среды.

Хотя считается, что чем дольше институционализация и чем позже вмешательство приемной опеки, тем более выражен дефицит тормозного контроля и рабочей памяти (McDermott et al., 2013), все еще существует путаница с возрастом и продолжительностью размещения в учреждении. Например, существует мнение, что риск нарастания проблем определяется не постепенными изменениями, а скачкообразно, резко увеличиваясь в определенном временном диапазоне (Julian, 2013). Причем такой скачок может происходить в 6 месяцев для румынских детей, исследованных в рамках бухарестского проекта (Rutter, 2006), и в 18 месяцев для российских детей (Naumova et al., 2019). Наличие такого граничного эффекта показано и в исследовании, в котором отмечено, что пребывание в кровной семье в течение первых 9 месяцев после рождения снижало тяжесть последствий дальнейшего пребывания в детском доме (Hawk et al., 2018).

Гипотеза настоящего исследования заключается в том, что существует критический период для формирования оптимальной рабочей памяти и тормозного контроля в течение первых 18 месяцев жизни ребенка. Это предполагает, что дети, помещенные в учреждение в течение этого периода, а затем в замещающую семью, не достигнут параметров рабочей памяти и тормозного контроля, которые будут обнаружены у детей, оказавшихся в учреждении после этого периода. Мы делаем это предположение, основываясь на взаимосвязи между этими исполнительными функциями, развитием префронтальной коры и важностью первых лет жизни в функциональном развитии префронтальной коры.

Материалы и методы

Выборка исследования

В исследовании приняли участие 130 детей, из которых 64 ($7,5 \pm 2,1$ лет) имели историю институционализации ($15,2 \pm 15,0$ месяцев) и на момент исследования жили в замещающих семьях ($48,6 \pm$

± 25,1 месяцев). Группа сравнения состояла из 66 детей (6,6 ± 1,8 лет), живущих в семьях с биологическими родителями и никогда не имевших опыта институционализации. Группы не различались по полу, уровню невербального интеллекта или уровню образования матерей, но биологические матери были в среднем на 10 лет моложе замещающих матерей.

Группу приемных детей мы разделили на тех, кто был размещен в учреждении в возрасте до 18 мес. ($n = 35$; возраст размещения в учреждении $6,9 \pm 10,6$ мес.; продолжительность размещения в учреждении $14,6 \pm 10,4$ мес.; пребывание в приемной семье $54,0 \pm 23,8$ мес.) и тех, кто оказался в учреждении после 18 мес ($n = 29$; возраст размещения в учреждении $49,3 \pm 30,6$ мес.; продолжительность размещения в учреждении $16,0 \pm 19,4$ мес.; пребывание в приемной семье $42,1 \pm 25,4$ мес.). Группы не имеют значимых различий в продолжительности как опыта институционализации ($U = 44$; $p = 0,35$), так опыта пребывания в замещающей семье ($t = -1,94$; $p = 0,058$).

Методики исследования

Для оценки тормозного контроля и рабочей памяти использовались два компьютерных теста,

программное обеспечение для которых было установлено на ноутбуке с операционной системой Windows 11. Тормозный контроль определялся с использованием парадигм go/go и go/no-go (Вергунов и др., 2009) в рамках двух экспериментальных серий соответственно. Параметры рабочей памяти оценивались с помощью теста зрительной рабочей памяти (Разумникова и др., 2016), включающего три экспериментальные серии.

Результаты

Хотя между группами с тем или иным опытом институционализации различий не обнаружено ни по одному из показателей, значимые различия были найдены при сравнении этих групп с детьми, не имеющими никакого опыта пребывания в учреждении. Мы обнаружили, что ключевые результаты тестов на оценку как рабочей памяти, так и тормозного контроля были значимыми при сравнении группы детей без опыта институционализации с теми, кто поступил в учреждение в возрасте до 18 месяцев (табл. 1, 2), тогда как с детьми с опытом поздней институционализации (поступление в возрасте после 18 мес.) различий не найдено.

Таблица 1

Результаты теста на оценку параметров рабочей памяти для групп с опытом институционализации (фактор – поступление в учреждение в возрасте до или после 18 мес.) и группы сравнения, никогда не имеющей подобного опыта

Фактор (до и после 18 мес.)			Объем рабочей памяти в 3-й серии теста				Обучение как следствие воспроизведения в рабочей памяти			
			Dif	SE	df	Тест Шеффе	Dif	SE	df	Тест Шеффе
Никогда	–	После 18 мес.	2,11	1,43	125	0,34	1,93	1,23	125	0,07
	–	До 18 мес.	3,45	1,30	125	0,032	2,70	1,12	125	0,046
После 18 мес.	–	До 18 мес.	1,34	1,39	125	0,63	0,77	1,21	125	0,75
			$F = 3,57$; $p = 0,031$; $\eta^2 = 0,05$				$F = 3,00$; $p = 0,041$; $\eta^2 = 0,05$			

Таблица 2

Результаты теста на оценку тормозного контроля для групп с опытом институционализации (фактор – поступление в учреждение в возрасте до или после 18 мес.) и группы сравнения, никогда не имеющей подобного опыта

Фактор (до и после 18 мес.)			Кол-во ошибок в go/no-go серии				Кол-во пропущенных стимулов в go/go серии				Кол-во пропущенных стимулов в go/no-go серии			
			Dif	SE	df	Тест Шеффе	Dif	SE	df	Тест Шеффе	Dif	SE	df	Тест Шеффе
Никогда	–	После 18 мес.	-1,15	1,16	125	0,58	-2,53	2,32	125	0,55	-3,10	2,99	125	0,59
	–	До 18 мес.	-2,59	01,04	125	0,037	-5,24	2,08	125	0,045	-7,08	2,68	125	0,033
После 18 мес.	–	До 18 мес.	-1,43	1,13	125	0,415	-2,71	2,27	125	0,46	-3,98	2,92	125	0,40
			$F = 3,13$; $p = 0,047$; $\eta^2 = 0,05$				$F = 3,18$; $p = 0,045$; $\eta^2 = 0,04$				$F = 3,53$; $p = 0,032$; $\eta^2 = 0,05$			

Обсуждение

Выводы данного исследования показывают, что результаты рабочей памяти и тормозного контроля у детей, которые были помещены в детский дом после 18 месяцев, но позже оказались в замещающей семье, сопоставимы с результатами у детей без опыта институционализации. Однако такое соответствие не наблюдается у детей, которые были помещены в детский дом до 18 месяцев. Кроме того, рано институционализированные дети в конечном итоге проводили больше времени в замещающей семье, чем поздно институционализированные дети. Однако благотворное влияние помещения в семью на когнитивные функции было более успешным у поздно институционализированных детей. Правило «чем раньше, тем лучше», вероятно, не применимо и к выборке данного исследования, поскольку некоторые из рано институционализированных детей были помещены в замещающие семьи через 2–3 месяца после поступления в учреждение, но это не повлияло на их результаты.

При поиске общего знаменателя, который может помочь объяснить негативное влияние институционализации в критические периоды раннего развития мозга, отсутствие в первую очередь материнской ласки предлагается здесь как основная причина подобных негативных эффектов. Животные модели материнской изоляции вызывают гипомиелинизацию в префронтальной коре, что частично объясняет долгосрочные последствия раннего детского опыта для развития рабочей памяти и тормозного контроля, описанные в этой статье (Liu et al., 2012).

Ограничением исследования являются широкий возрастной диапазон исследуемой выборки, а также отсутствие информации о пренатальном периоде развития детей и качестве детско-родительских отношений с их биологическими родителями в первые 18 месяцев жизни, что ограничивает возможности интерпретации. Наконец, настоящее исследование является поперечным, что исключает утверждения о причинно-следственных механизмах наблюдаемых результатов.

Однако результаты имеют практическую направленность. Институциональная среда – это то место, где при наличии когнитивной стимуляции, присмотра и полноценного питания, все еще не хватает персональной материнской ласки. Полученные данные могут оказаться полезными для служб, поддерживающих будущих и молодых матерей, находящихся в зоне риска, чтобы максимально исключить травму разлучения младенцев с биологическими матерями.

Литература

1. Вергунов Е.Г., Николаева Е.И. Опыт применения методов визуализации в качественном анализе тайм-теста // Мир науки, культуры, образования. 2009. № 7–2. С. 128–131.
2. Пазумникова О.М. Программный комплекс для определения характеристик зрительно-пространственной памяти. Авторское свидетельство 2016617675. 2016. Портал психологических изданий PsyJournals.ru.
3. Bowlby J. Maternal care and mental health // Geneva: World Health Organization. 1951. V. 2. P. 179.
4. Diamond A. Executive functions // Annual review of psychology. 2013. 64(1). P. 135–168.
5. Friedman N.P. & Robbins T.W. The role of prefrontal cortex in cognitive control and executive function // Neuropsychopharmacology. 2022. 47(1). P. 72–89.
6. Gunnar M., Quevedo K. The neurobiology of stress and development // Annu. Rev. Psychol. 2007. V. 58. P. 145–173.
7. Hawk B.N., McCall R.B., Groark C.J., Muhamedrahimov R.J., Palmov O.I., Nikiforova N.V. Caregiver sensitivity and consistency and children's prior family experience as contexts for early development within institutions // Infant Ment. Health J. 2018. V. 39. P. 432–448.
8. Julian M.M. Age at adoption from institutional care as a window into the lasting effects of early experiences // Clin. Child. Fam. Psychol. Rev. 2013. V. 16. P. 101–145.
9. Liu J., Dietz K., DeLoyht J.M., Pedre X., Kelkar D., Kaur J. Impaired adult myelination in the prefrontal cortex of socially isolated mice. Nat. Neurosci. 2012. V. 15. P. 1621–1623.
10. Lund J.I., Boles K., Radford A., Toombs E., Mushquash C.J. A systematic review of childhood adversity and executive functions outcomes among adults // Arch. Clin. Neuropsychol. 2022. V. 37. P. 1118–1132.
11. McDermott J.M., Troller-Renfree S., Vanderwert R., Nelson C.A., Zeanah C.H., Fox N.A. Psychosocial deprivation, executive functions, and the emergence of socio-emotional behavior problems // Front. Hum. Neurosci. 2013. P. 77–167.
12. Naumova O.Y., Rychkov S.Y., Kornilov S.A., Odintsova V.V., Anikina V.O., Solodunova M.Y., ... & Grigorenko E.L. Effects of early social deprivation on epigenetic statuses and adaptive behavior of young children: A study based on a cohort of institutionalized infants and toddlers // PLoS One. 2019. V. 14(3). e0214285.
13. Nelson C.A., Gabard-Durnam L.J. Early adversity and critical periods: neurodevelopmental consequences of violating the expectable environment // Trends Neurosci. 2020. V. 43. P. 133–143.
14. Nikolaeva E.I., Dydenkova E.A., Mayorova L.A., Portnova G.V. The impact of daily affective touch on cortisol levels in institutionalized & fostered children // Physiology & Behavior. 2024. 277. 114479.
15. Rutter M. The psychological effects of early institutional rearing // Oxford: Oxford University Press, 2006.
16. Wade M., Fox N.A., Zeanah C.H., Nelson C.A. Long-term effects of institutional rearing, foster care, and brain activity on memory and executive functioning // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2019. V. 116(5). P. 1808–1813.
17. Walasek N., Panchanathan K., Frankenhuis W.E. The evolution of sensitive periods beyond early ontogeny: bridging theory and data // Funct. Ecol. 2024.

Перспективы квантовой теории сознания

В.М. Еськов¹, М.А. Филатов², А.Ю. Кухарева², Е.Г. Мельникова²

¹НИЦ «Курчатовский институт» Сургутский филиал ФГУ «ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований», Сургут

²Сургутский государственный университет

В самом начале 21-го века появилась серия работ М.Б. Менского по квантовой теории сознания. Эти работы были опубликованы в научном журнале «Успехи физических наук», где главным редактором был нобелевский лауреат В.Л. Гинзбург. Он активно поддерживал эти работы М.Б. Менского, но строгих доказательств тогда никто не представил. Сейчас мы на основе открытого эффекта Еськова – Зинченко (ЭЗ) представляем новые доказательства квантовой теории сознания (КТС) и даем представления о реальных перспективах развития КТС.

При обсуждении представлений М.Б. Менского о КТС следует отметить, что этот физик особым образом выделял фактор неопределенности в квантовой механике. Достаточно вспомнить парадокс Шредингера с котом, когда (до опыта) мы считаем, что кот находится в двух разных состояниях (живой или мертвый).

Аналогичная ситуация происходит и с нашим сознанием, когда на бессознательном уровне (с помощью ревербераций гиппокампа) в нейросетях мозга (НСМ) происходит рождение множественных состояний НСМ. Все такие состояния реально существуют, но до нашего сознания доходит только одно. Как происходит такой выбор (из многих состояний – одно)? Именно на это мы сейчас обращаем особое внимание с позиций нового эффекта. Именно этот ЭЗ раскрывает нам сущность работы мозга, его нейросетей. Без ЭЗ мы не можем понять базовые принципы работы мозга и не можем создать его модели.

Итак, переход от бессознательного (много состояний) в сознательное – это главная фундаментальная проблема всех наук о мозге. Одновременно это проблема связана с базовыми принципами работы новых искусственных нейросетей (ИНС). Эти ИНС должны максимально выполнять базовые принципы работы НСМ.

Более того, открытие ЭЗ позволяет нам доказать реальность КТС М.Б. Менского и создать новую квантовую теорию сознания (НКТС). Она должна основываться на фундаментальных принципах работы мозга человека. Очевидно, что все это требует и нового понимания этих фундаментальных принципов работы биосистем.

Последние, еще в 1948 году, W. Weaver (один из основоположников теории информации) обозначил как системы третьего типа (СТТ). Для СТТ W. Weaver предложил создать новую (третью, после детерминизма и стохастики) науку. Однако он сам тогда особых свойств СТТ не доказал. Это сделали мы за последние 25 лет [1–4].

В итоге было доказано, что мозг хаотичен. Он генерирует паттерны (его НСМ), которые статистически не могут быть повторены. Впервые на это обратил внимание М.В. Сергиевский, при изучении сети дыхательных нейронов (эффект звездного неба – мерцание). Еще в 1971–1978 гг. мы с проф. В.Е. Якуниным многократно наблюдали затухание и восстановление дыхательных нейронов. В итоге доказали (уже тогда) хаос в работе НСМ.

Немного позже, при сравнении выборки электромиограмм (диафрагмального нерва) и электроэнцефалограммы (ЭЭГ), мы доказали их стохастическую уникальность. Невозможно произвольно получить повторение выборки ЭЭГ. Мозг человека хаотичен. Это фундаментальные принципы работы нашего сознания. Нет одинаковых электромиограмм (ЭНГ), электромиограмм (ЭМГ) и ЭЭГ!

Главная проблема, которая решена в НКТС, связана с реальностью хаоса в поведении активности НСМ. Одновременно хотим подчеркнуть, что НСМ находятся в непрерывной активности. Известно, что если биопотенциалы мозга в виде $x = x(t)$ будут находиться в покое, то такой мозг будет мертвым. Ситуация, когда $x(t) = 0$, реализуется только мертвым мозгом. Это означает клиническую смерть мозга.

При этом и весь организм тоже начинает умирать. Работа сердца, мышц начинает угасать. Поэтому $dx/dt \neq \text{const}$ и непрерывный хаос в поведении НСМ характеризует главные свойства мозга человека. Это необходимо учитывать при разработке новых искусственных нейросетей на новых принципах.

До настоящего времени ИНС использовали уже известные два базовых свойства нейронов мозга. Во-первых, моделировались пороговые свойства нейронов. Во-вторых, моделировались коммуникативные свойства нейронов. Иными словами, ИНС использовали связи для изучения сети нейронов, где менялись веса w связи.

Сейчас эти два базовых свойства НСМ активно используются во всех ИНС. Однако мы сейчас обращаем внимание всех исследователей в области нейронаук, что НСМ имеют еще два особых свойства: хаос в динамике НСМ и непрерывные реверберации, т. е. генерация разных ЭЭГ. Их ИНС не учитывали.

Именно эти два новых свойства мы сейчас ввели в работу новых ИНС. Тем самым мы расширили возможности ИНС, приблизили их к работе реальных НСМ. Сейчас запатентованные нами ИНС позволяют разрешать проблему раскрытия неопределенности 1-го типа, когда стати-

стика не показывает различий для биосистем, а новая ИНС их дает.

Однако главная проблема новых ИНС – это решение задачи системного синтеза. Напомним, что в общем виде эта задача не решена в современной математике. Более того, современная наука не работает с неоднородными группами испытуемых. Уникальность выборок и потеря однородности групп полностью завершает дальнейшее применение теории динамических систем (ТДС) и всей статистики в изучении любых таких (особых) систем. Биосистемы не объект современной науки!

Однако новые ИНС раскрывают неопределенность 1-го типа и позволяют находить параметры порядка. Это означает, что мы можем из множества диагностических признаков x_i находить главные $x_i^*(t)$. Именно эти главные $x_i^*(t)$ и являются параметрами порядка. Эту задачу сейчас решают новые ИНС.

В итоге мы приходим к новому пониманию работы мозга. Мозг хаотичен, он имеет максимум неопределенности, что имеет место и в квантовой физике. Достаточно вспомнить принцип неопределенности Гейзенберга. Отметим, что для биосистем (систем третьего типа – СТТ по классификации W. Weaver) тоже был введен некий аналог неопределенности.

В целом мы приходим к новому пониманию жизни и к пониманию новых принципов работы мозга. Все это составляет основу новой квантовой теории сознания. В этой НКТС наблюдается хаос, аналог принципа неопределенности Гейзенберга, и новое множество вариантов реальности, что эквивалентно теории Х. Эверетта (о параллельных мирах). В действительности реализуется только один вариант.

Отметим, что в теории Х. Эверетта использовалась реальность многих вселенных. В НКТС это достигается как следствие помещения в бессознательное огромного количества будущих реальностей.

Очевидно, что при переходе из бессознательного в сознательное реализуется только одна реальность. Это происходит и при редукции волновой физики Ψ . Исходно в волновом пакете мы имеем много состояний: $\Psi_1 + \Psi_2 + \dots + \Psi_n$.

При редукции волновой функции мы попадаем только в одну вселенную (по Эверетту). Аналогично происходит и при переходе от бессознательного в сознательное. Когда сознание реализует последовательно только одну реальность, все остается в бессознательном.

При регистрации 15 выборок любых параметров функций организма человека на каждом ин-

тервале времени Δt_1 реализуется только одна выборка. Далее, на $\Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ реализуются другие n выборок.

Очевидно, что каждая такая выборка потенциально (на бессознательном) уже может существовать. Однако при регистрации треморограмм (ТМГ), теппинграмм (ТПГ), ЭЭГ, ЭМГ, ЭНГ и т. д. всегда реализуется одна (конкретная) выборка такого параметра.

В итоге получаем аналог с теорией Эверетта и с принципом неопределенности Гейзенберга для всех биосистем. Уникальность любой выборки $x_i(t)$ и потеря однородности любой группы завершает дальнейшее применение всей теории динамических систем и статистики для биосистем.

Основываясь на ЭФЗ, мы теперь можем говорить и о возможных механизмах перехода от бессознательного в сознание (осознание). Очевидно, что НСМ генерирует многие повторения решений одной задачи. При этом может существовать некий сумматор, который выбирает те позиции (решения), которые имеют наибольший вес (данного решения).

Именно так сейчас работают новые ИНС, которые мы разработали. Они повторяют решение одной и той же задачи многократно, и идет накопление выборок полученных весов диагностических признаков.

В итоге ИНС рассчитывает средние веса по полученным выборкам. Наибольшие значения таких весов $\langle w_i \rangle$ мы и оставляем как параметры порядка.

Следует отметить, что задача нахождения параметров порядка в современной математике пока не решена. Более того, она не решается в принципе из-за уникальности любой выборки любого параметра человека. Открываются новые перспективы во всех науках о жизни.

Литература

1. *Betelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A., Gavrilenko T.V.* Stochastic volatility in the dynamics of complex homeostatic systems // *Doklady Mathematics*. 2017. V. 95(1). P. 92–94.
2. *Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Eskov V.M., Vokhmina Y.V.* Phenomenon of statistical instability of the third type systems – complexity // *Technical physics*. 2017. V. 62(11). P. 1611–1616.
3. *Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Zimin M.I.* Uncertainty in the quantum mechanics and biophysics of complex systems // *Moscow University Physics Bulletin*. 2014. No. 69 (5). P. 406–411.
4. *Eskov V.V., Filatova D.Y., Ilyashenko L.K., Vokhmina Y.V.* Classification of uncertainties in modeling of complex biological systems // *Moscow university physics bulletin*. 2019. V. 74(1). P. 57–63.

Адаптационный потенциал и риски в развитии рабочей памяти дошкольников, родившихся недоношенными

О.А. Иванова, Е.Н. Яковец

Воронежский государственный университет

Понятие исполнительных функций является достаточно новым в отечественной психологии. Ранее ученые рассматривали их в рамках проблемы когнитивного развития. Однако значительное продвижение в области психофизиологических исследований обусловило необходимость специального уточнения понятия, которое объединило бы некоторые когнитивные процессы; развитие их является чрезвычайно важным в детском возрасте.

По мнению Е.И. Николаевой, исполнительные функции – это совокупность нисходящих ментальных процессов, необходимых для концентрации внимания, когда автоматическое, инстинктивное, интуитивное поведение становится неэффективным или невозможным. Выделяют 3 основные исполнительные функции: тормозный контроль, когнитивную гибкость и рабочую память [1].

Многие данные подтверждают важнейшую роль исполнительных функций для психического и физического здоровья, а также для повышения качества жизни. В лонгитюдном исследовании Т.Е. Moffitt и др. 1000 детей наблюдались в течение 32 лет (96 % от общего числа детей), чтобы сравнить детей с разным уровнем контроля торможения. Спустя 30 лет они обнаружили, что дети, которые демонстрировали лучший контроль торможения, с более высокой настойчивостью и вниманием, с меньшей импульсивностью, во взрослом возрасте имели более высокое качество жизни, характеризующееся лучшим здоровьем, достатком и занятостью, и более низкий уровень преступности, по сравнению с их сверстниками с одинаковым IQ, полом, социальным и семейным происхождением, но с более низким контролем торможения в детстве [2].

В рамках исследования исполнительных функций дошкольников, родившихся раньше срока, мы предположили, что существует связь рабочей памяти, уровня невербального интеллекта и психологических характеристик их матерей (их формально-динамических характеристик и уровня эмоционального интеллекта). Выборку составили недоношенные дети, родившиеся с I, II, III, IV степенями недоношенности. Общий объем выборки 40 детей. Базой исследования стала БУЗ ВО «ВГКП № 4» Детская поликлиника № 11 (г. Воронеж, Россия). В исследовании применялись следующие методики:

- «Программный комплекс для определения характеристик систем зрительно-пространственной памяти» (О.М. Разумникова);

- Методика определения уровня общего и невербального интеллекта «Цветные прогрессивные матрицы» (Дж. Равен);

- Опросник «Формальные характеристики поведения» (Я. Стреляу);

- Методика «Опросник ЭмИн» (Д.В. Люсин).

При исследовании рабочей памяти мы обращали внимание на процессы интерференции и обучения. Интерференция – это своего рода «забывание», которое помогает переключаться на различные стимулы и не удерживать в памяти неактуальную на данный момент информацию. Обучение – это процесс поиска оптимальной стратегии для выполнения задания.

По методике «Формальные характеристики поведения» (Я. Стреляу) были выявлены следующие психологические характеристики матерей дошкольников, родившихся раньше срока:

- динамичность (живость) – определяет способность к быстрому реагированию на различные стимулы;

- настойчивость – способность человека к проявлению постоянства в поведении;

- сенсорная чувствительность – определяет степень реагирования на стимулы с низкими показателями интенсивности;

- эмоциональная реактивность – интенсивное реагирование на сильные эмоциональные стимулы;

- выносливость – способность адекватно реагировать в ситуации с длительной и/или сильно выраженной стимуляцией;

- активность – тенденция совершать действия высокой стимулирующей силы.

По методике «Опросник ЭмИн» (Д.В. Люсин) выявлялся уровень эмоционального интеллекта матерей обследуемых детей.

Нами были установлены сильные корреляционные связи ($\rho = 0,01$) практически между всеми исследуемыми параметрами рабочей памяти, невербального интеллекта и характеристиками матерей дошкольников, родившихся раньше срока. Результаты корреляционного анализа между рабочей памятью дошкольников, родившихся недоношенными, и формально-динамическими характеристиками их матерей представлены в табл. 1.

Полученные результаты мы объясняем высоким влиянием личностных характеристик матери на компенсаторное развитие ребенка. Низкие же корреляционные связи мы связываем с тем, что у детей, родившихся раньше срока, формирование структур мозга происходит не внутриутробно, а в постнатальный период. Матери, которые слишком активны и выносливы, могут использовать достаточно агрессивную стратегию занятий с ребенком и не давать ему справиться с задачей самостоятельно (а именно при таком решении задачи формируются нейронные связи), а сразу давать

правильный ответ. Так, в дальнейшем ребенок не проявляет самостоятельности в решении задач, а ждет правильный ответ от матери.

Таблица 1

Результаты корреляционного анализа между рабочей памятью дошкольников, родившихся недоношенными, и формально-динамическими характеристиками их матерей

	Интерференция	Обучение
Динамичность	0,428	0,738
Настойчивость	0,024	0,774
Сенсорная чувствительность	0,667	0,936
Эмоциональная реактивность	0,651	0,53
Выносливость	0,422	0,107
Активность	0,475	0,317
ОЭИ	0,639	0,577
Равен	0,431	0,431

Далее мы предположили, что существует связь между сроком гестации, на котором родился ребенок, и уровнем развития его невербального интеллекта и рабочей памятью, а также между уровнем развития эмоционального интеллекта матери и развитием рабочей памяти и невербального интеллекта дошкольников, родившихся недоношенными. По результатам корреляционного анализа были получены следующие данные (табл. 2).

Таблица 2

Результаты корреляционного анализа между сроком гестации, уровнем эмоционального интеллекта матерей и рабочей памятью и невербальным интеллектом дошкольников, родившихся недоношенными

Исследуемый параметр	Невербальный интеллект	Объем рабочей памяти	Интерференция	Обучение
Срок гестации	<0,1	0,001	0,001	0,001
Общий эмоциональный интеллект матери	0,001	0,001	<0,1	0,001

Таким образом, со сроком гестации была выявлена корреляция только с невербальным интеллектом. Вероятно, на развитие интеллекта обращается особое внимание и в дошкольных учреждениях, а также мамы самостоятельно развивают его, тогда как рабочая память формируется самостоятельно.

С общим эмоциональным интеллектом не коррелирует только показатель интерференции. Полученные данные согласуются с исследованиями Е.И. Николаевой, которая показала, что данный процесс формируется ближе к 7 годам, а его формирование тесно связано с созреванием мозга. Вероятно, вне зависимости от эмоционального интеллекта матери интерференция будет сформирована позже.

Следует отметить, что дети разных возрастов используют разные стратегии при прохождении методики «Программный комплекс для определения характеристик систем зрительно-пространственной памяти» (О.М. Разумникова). Данные различия наглядно представлены на рис. 1 и 2.

Таким образом, ближе к 7 годам в группе старших дошкольников наблюдается больше тех, у кого сформированы оба процесса рабочей памяти, что говорит о созревании мозга.

Средний дошкольный возраст



Рис. 1. Распределение развития процессов обучения и интерференции у детей среднего дошкольного возраста (4–5 лет)

Старший дошкольный возраст



Рис. 2. Распределение развития процессов обучения и интерференции у детей старшего дошкольного возраста (6–7 лет)

Итак, развитие рабочей памяти ребенка связано с уровнем развития общего эмоционального интеллекта матери, а также со сроком гестации, на котором родился ребенок. На наш взгляд, адапционным потенциалом для недоношенных детей в дошкольном возрасте обладают не только методики развития интеллекта, но и внимание к их исполнительным функциям, которые влияют на способность принимать решения, успешность в школьном обучении и в конечном итоге на адаптацию ребенка к социуму.

Литература

1. Николаева Е.И. Что такое «Executive functions» и их развитие в онтогенезе / Е.И. Николаева, Е.Г. Вергунов // Теоретическая и экспериментальная психология. 2017. V. 10, no. 2. С. 62–81.
2. Moffitt T.E. A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety / T.E. Moffitt, L. Arseneault, D. Belsky, N. Dickson, R.J. Hancox, H. Harrington, A. Caspi // Proceedings of the National Academy of Sciences, USA. 2011. V. 108. P. 2693–2698.
3. Davis J.C. The independent contribution of executive functions to health related quality of life in older women / J.C. Davis, C.A. Marra, M. Najafzadeh, T. Lui-Ambrose // BMC Geriatrics. 2010. V. 10. P. 16.
4. O'Shaughnessy T. Children placed at risk for learning and behavioral difficulties: Implementing a school-wide system of early identification and prevention / T. O'Shaughnessy, K.L. Lane, F.M. Gresham, M. Beebe-Frankenberger // Remedial and Special Education. 2003. V. 24. P. 27–35.
5. Bergman Nutley S. Gains in fluid intelligence after training non-verbal reasoning in 4-year-old children: A controlled, randomized study / S. Bergman Nutley, S. Söderqvist, S. Bryde, L.B. Thorell, K. Humphreys, T. Klingberg // Developmental Science. 2011. V. 14. P. 591–601.

6. *Mackey A.P.* Differential effects of reasoning and speed training in children / A.P. Mackey, S.S. Hill, S.I. Stone, S.A. Bunge // *Developmental Science*. 2011. V. 14. P. 582–590.
7. *Karbach J.* How useful is executive control training? Age differences in near and far transfer of task-switching training / J. Karbach, J. Kray // *Developmental Science*. 2009. V. 12. P. 978–990.
8. *Lakes K.D.* Promoting self-regulation through school-based martial arts training / K.D. Lakes, W.T. Hoyt // *Applied Developmental Psychology*. 2004. V. 25. P. 283–302.
9. *Riggs N.R.* The mediational role of neurocognition in the behavioral outcomes of a social-emotional prevention program in elementary school students: Effects of the PATHS curriculum / N.R. Riggs, M.T. Greenberg, C.A. Kusché, M.A. Pentz // *Prevention Science*. 2006. V. 7. P. 91–102.
10. *Raver C.C.* Improving preschool classroom processes: Preliminary findings from a randomized trial implemented in Head Start settings / C.C. Rave, S.M. Jones, C.P. Li-Grining, M. Metzger, K.M. Champion, L. Sardin // *Early Childhood Research Quarterly*. 2008. V. 23. P. 10–26.
11. *Diamond A.* Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old / A. Diamond, K. Lee // *Science*. 2011. V. 333. P. 959–964.
12. *Thorell L.B.* Training and transfer effects of executive functions in preschool children / L.B. Thorell, S. Lindqvist, N. Bergman, G. Bohlin, T. Klingberg // *Developmental Science*. 2009. V. 12. P. 106–113.

Нейроморфная кибернетика

В.Б. Казанцев

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Нейроморфные технологии можно с уверенностью отнести к одному из междисциплинарных трендов развития современной науки. По сути, они объединяют подходы к разработке информационно-вычислительных устройств на основе имитации структуры и функций нейронных сетей мозга. В отличие от традиционных искусственных нейронных сетей (ИНС), используемых в различных приложениях обработки информации, нейроморфные системы строятся на основе аналоговых элементов, имитирующих работы реальных нейронов и синапсов. К таким системам, в частности, относятся спайковые нейронные сети, моделирующие динамику нейронов мозга. В технологическом аспекте особый интерес представляет реализация нейроморфных систем с помощью так называемых мемристоров – электронных элементов, имеющих набор состояний с различным сопротивлением и способностью переключаться между ними. Стратегическим преимуществом нейроморфных устройств на основе мемристоров является низкое энергопотребление, на несколько порядков ниже, чем в традиционных цифровых вычислителях. Проблемой нейроморфных сетей на основе спайковых нейронов и биологоподобных архитектур является неприменимость традиционных алгоритмов обучения (в частности, алгоритма обратного распространения ошибки), что затрудняет их практическое использование в инженерных проектах. Тем не менее различные

гибридные варианты нейроморфных процессоров активно разрабатываются и тестируются как у нас в стране, так и за рубежом.

Одним из прикладных направлений применения нейроморфных вычислителей является робототехника и, в частности, биоморфные роботы. Такие роботы повторяют основные принципы биомеханики и локомоций животных и человека (гуманоидные роботы). Создание компактных приводных компонентов и источников энергии привело к разработке автономных роботов, способных не только перемещаться, но и выполнять различные функции, имитируя животных и человека. Примером таких роботов, доступных в настоящее время и в коммерческом исполнении, являются робособаки и гуманоидные роботы. В разработке гуманоидных комплексов (шагающая платформа, антропоморфный манипулятор) решающую роль сыграли нейросети имитационного обучения, что позволило решить задачу устойчивой ходьбы и бега, а также реализацию сложных движений (танец, борьба и др). По сути, такие роботы представляют собой нейроморфные кибернетические системы, где искусственные нейросети выступают в качестве системы управления биоморфным «телом» робота.

В докладе пойдет речь как о нейроморфных сетевых моделях, так и о разработке биоморфных робототехнических решений, имитирующих плавание рыб и полет птиц.

Когнитивно-ориентированный подход к проектированию гибридных систем поддержки принятия решений для сложных предметных областей

С.В. Ковальчук¹, М.А. Витко¹, Я. Ли¹, О.В. Кубряк²

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург; kovalchuk@itmo.ru

²НИУ «МЭИ», Москва; kubriakov@mpei.ru

Введение

Сегодня технологии искусственного интеллекта (ИИ) находят широкое применение [1, 2] при построении систем поддержки принятия решений (СППР) в различных предметных областях, таких как медицина, юриспруденция, управление предприятиями и пр. В то же время современные технологии ИИ (в первую очередь – технологии глубокого обучения) отличаются высокой сложностью и слабой интерпретируемостью, что приводит к усложнению взаимодействия лиц, принимающих решения (ЛПР) с СППР. Зачастую данный вопрос рассматривается в ключе обеспечения нужного уровня объяснимости и доверия со стороны систем ИИ [3]. Однако вопрос организации взаимодействия ЛПР и ИИ в рамках СППР представляется более широким и связан не только с изолированной разработкой ИИ-решений, а с организацией корректного взаимодействия двух агентов (ЛПР и агента ИИ) в рамках решения поставленной задачи (принятия решений). Решение этой задачи включает в себя двунаправленное взаимодействие указанных агентов, а также учет индивидуальных особенностей ЛПР, что приобретает особую значимость в предметных областях, характеризующихся большой сложностью, ввиду различного опыта ЛПР, уровня его ожиданий от ИИ, консервативности мнения, внутреннего и внешнего контекста решения и пр. [4].

В данном исследовании предлагается подход к построению гибридной модели СППР, в которой учитываются самостоятельные, но взаимосвязанные роли ЛПР и ИИ с явным структурированием этой взаимосвязи в рамках работы. В данном подходе учет взаимной оценки ЛПР и ИИ позволяет перейти к высокоуровневым моделям взаимодействия и рассуждения, таким как, например, основанным на теории разума (Theory of Mind, ToM) [5].

Гибридная модель поддержки принятия решений

Обобщенная концептуальная модель гибридной СППР представлена на рис. 1. В системе присутствуют три основные подсистемы. Первая подсистема S определяет базовую структуру действий ЛПР: доступные наблюдения O_H обеспечивают ЛПР информацией о состоянии среды в рамках эпизода принятия решения E , опираясь на которые ЛПР принимает решения (совершает действия) A_H . Эффективность решений может быть оценена с точки зрения максимизации функции полезности

$\text{argmax}_{A_H}(U(E(A_H)))$. Вторая подсистема I определяет действия агента ИИ, располагающего собственными наблюдениями O_I (которые могут как совпадать с наблюдениями ЛПР, так и отличаться от них) и осуществляющего поддержку принятия решений путем действия A_I (предоставления информации ЛПР). Третья подсистема R обеспечивает доступ к ресурсам – вычислительным, информационным, а также базе прецедентов (истории эпизодов принятия решений). Подсистема R является пассивной и может быть использована как ЛПР, так и ИИ в процессе принятия решений.

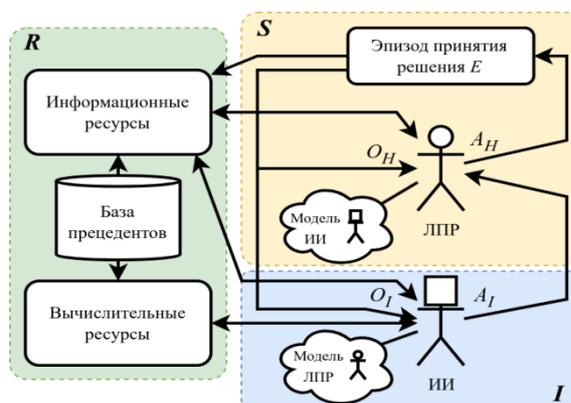


Рис. 1. Обобщенная структура процесса принятия решений в рамках гибридной СППР

Зачастую решения в рамках СППР формализуются как оценка оптимального решения для ЛПР, т. е. $A_I = A_H^*(O_I)$. Соответственно, выбор осуществляется с точки зрения $\text{argmax}_{A_I}(U(E(A_H^*(O_I))))$. При этом решения выбираются с использованием базы прецедентов подсистемы R . Такой подход хорошо зарекомендовал себя в решении задач с четкой постановкой и явными критериями качества, однако в задачах сложных предметных областей зачастую его применение затруднено в силу ряда причин.

Во-первых, в силу необходимости учета индивидуальных особенностей ЛПР, формирующих «внутренний контекст» принятия решения S_H , дополняющий «внешний контекст» E . При этом внутренний контекст ЛПР принципиально отличается от внутреннего контекста ИИ и напрямую недоступен наблюдению. Внутренний контекст определяется когнитивными характеристиками ЛПР, его опытом, профессиональными навыками и привычками. «Внутренний контекст» ИИ определяется его техническими характеристиками (архитектурой нейросети, сценариями применения, императивными и декларативными знаниями и пр.).

Во-вторых, наилучшее взаимодействие ИИ и ЛПР (A_I) часто ожидается не «копирующим» решением ЛПР, а «коплементарным» им. Как следствие, $A_I = f(C_H^*, O_I)$, где C_H^* – оценка внутреннего контекста ЛПР. При этом очевидно, что при оценке внутреннего контекста необходимо учитывать, что его компоненты обладают многомасштабной динамикой: оперативной – внутренний контекст зависит от текущего эпизода, краткосрочной – например, в рамках рабочей смены, истории эпизодов, долгосрочной – в рамках накопления опыта. В более общем случае можно говорить о том, что агент ИИ формирует модель ЛПР для оценки действий $A_H^*(O_H, A_I)$, что позволяет оптимизировать совместную эффективность действий со стороны ИИ как $argmax_{A_I}(U(E(A_H^*(O_H, A_I))))$.

В-третьих, ЛПР, взаимодействуя с ИИ, формирует совокупность ожиданий, систему оценок действий ИИ, связанных с контекстом принятия решений, которые формируют фактические механизмы принятия решений как $A_H(O_H, M(A_I))$, где M – система метрик и оценок на ЛПР с учетом внутреннего контекста C и ожиданий ИИ (модели ИИ).

Данную систему можно рассматривать также как задачу управления, где объект управления – эпизод принятия решений, субъект управления – ЛПР. При этом, если в базовой схеме (подсистема S) входной сигнал ограничивается O_H , в предлагаемой схеме гибридная система включает в себя подсистему I в качестве дополнительного наблюдателя, подающего сигнал A_I . При этом порядок наблюдателя в данной системе может отличаться от наблюдения O_H в силу других механизмов обработки данных со стороны ИИ, расширенного доступа к ресурсам (например, возможности агрегации и непосредственного применения большой базы прецедентов, доступа к расширенным вычислительным ресурсам и пр.). В рамках данного механизма становится возможным оптимизация искусственной обратной (от агента ИИ) связи с целью повышения качества управления [6].

Ключевой проблемой для построения подобной схемы является идентификация механизмов оценки, действующих в составе подсистемы I . В частности, необходима разработка: а) комплексной модели ЛПР, включая модель внутреннего контекста C_H и модель оценок M ; б) процедур применения моделей оценки для реализации более эффективных механизмов работы ИИ.

Структурирование внутреннего контекста лиц, принимающих решения

Проблема моделирования внутреннего контекста ЛПР C_H связана с крайне ограниченной его наблюдаемостью. Как следствие, выявление данного контекста становится возможным с использованием: а) косвенных признаков – информации о квалификации, роли, должностных обязанностях ЛПР и пр.; б) анализа базы прецедентов с точки зрения выявления моделей поведения ЛПР. Такая формализация может быть использована для па-

раметризации внутреннего контекста ЛПР. Так, в предыдущей работе [7] было показано, что использование персональных характеристик ЛПР позволяет значительно повысить качество моделирования восприятия рекомендаций ИИ M .

В рамках настоящего исследования проводилась оценка возможности структурирования внутреннего контекста и использования в задачах поддержки работы разработчиков программного обеспечения в части генерации кода с использованием больших языковых моделей (БЯМ). Для этого были использованы результаты проведенного ранее структурированного опроса программистов с целью оценки субъективных метрик (понятность, корректность, готовность использовать) кода, сгенерированного БЯМ [8]. При моделировании согласно методологии, предложенной в работе [7], также отмечалось улучшение предсказанной готовности использовать. В рамках эксперимента было получено снижение средней абсолютной ошибки предсказания с 0,321 без использования латентной переменной до 0,174 при $N = 2$ и 0,079 при $N = 8$ (значения в единицах по пятибалльной шкале Ликерта).

Далее, для задачи моделирования процесса внутренней оценки результатов генерации ИИ была разработана модель на основе Марковской модели процесса принятия решений (Markov Decision Process, MDP). Процесс в рамках MDP был сформулирован в рамках трех шагов оценки, соответствующих понятности, корректности и готовности использовать результаты генерации кода. На каждом этапе осуществлялась «фильтрация»: переход осуществлялся либо в следующее состояние оценки, либо в терминальное состояние с отклонением предложенного результата. Терминальное состояние с принятием предложенного результата достигалось в случае успешного прохождения всех трех оценок.

Для идентификации вероятностей переходов были использованы данные опроса с пороговым значением, обеспечивающим наибольшую сбалансированность классов в каждом состоянии. Для предсказания условий перехода были использованы модели на базе полносвязной нейросети, входными параметрами для которой служили векторы (эмбединги), описывающие внешний контекст (запрос на генерацию кода с описанием задачи) и внутренний контекст (персонализированный one-hot эмбединг, полученный в соответствии с подходом [7]). Для оценки эффективности предложенной MDP модели использовалась метрика точности предсказания бинарного класса «принятие» для сгенерированного кода (acceptance rate) с использованием 5-кратной кросс-валидации. Было показано, что применение предложенной MDP модели обеспечивает повышение качества предсказания до 0,829 в сравнении с 0,689 при прямом предсказании целевой характеристики регрессионной моделью (полносвязная нейросеть с тем же числом нейронов скрытого слоя), а также в сравнении с 0,707 при использовании MDP модели без указания персонализированного внутреннего вектора контекста.

Повышение качества рекомендаций искусственного интеллекта

Предложенный метод оценки позволяет эффективно фильтровать рекомендации ИИ, автоматически отклоняя те из них, которые с высокой вероятностью получают негативную оценку со стороны лица, принимающего решения ЛПП. В ходе исследования мы детально изучили возможности улучшения работы больших языковых моделей применительно к задачам генерации программного кода, реализовав два перспективных подхода.

Первый подход заключался в интеллектуальном структурировании подсказок (prompt engineering) с учетом персональных характеристик программиста. Эксперименты проводились на бенчмарке HumanEval [9] с использованием модели GPT-4o. В подсказки были включены такие параметры, как профессиональная специализация разработчика, ожидаемый уровень сложности кода, требования к форматированию, необходимость сопровождения тестами.

Результаты показали, что указание специализации разработчика и ожидаемого уровня сложности кода (что напрямую связано с внутренним контекстом ЛПП) дает наиболее значимый эффект. Метрика pass@1, оценивающая функциональную корректность сгенерированного кода, продемонстрировала рост с 0,622 при использовании стандартных подсказок до 0,842 при применении персонализированного подхода.

Второй подход предусматривал дообучение модели методом обучения с подкреплением на основе человеческой обратной связи (RLHF) с использованием алгоритма Proximal Policy Optimization (PPO). Для экспериментов был выбран набор данных CoNaLa [10], а в качестве функции вознаграждения использовалась нейросетевая оценка, анализирующая семантическую корректность кода, соответствие эталонным (референсным) решениям, соблюдение стилевых и архитектурных требований.

Реализация этого подхода позволила достичь последовательного улучшения качества генерируемого кода в процессе обучения. Особенно значимым оказалось влияние семантического анализа, который обеспечивал более точное соответствие кода исходным требованиям и профессиональным стандартам. Полученные результаты подтверждают перспективность комбинированного подхода, сочетающего персонализацию взаимодействия с адаптивным обучением моделей.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило принципиальную возможность и практическую осуществимость предложенного подхода к моделированию когнитивных характеристик ЛПП, в рамках гибридных СППР. Экспериментальные результаты, полученные на примере персонализированной генерации кода с использованием БЯМ, продемонстрировали значительный потенциал метода: учет внутреннего контекста ЛПП позволил не только повысить точность предсказания их ре-

акций, но и улучшить функциональное качество выдаваемых ИИ рекомендаций. В частности, применение модели MDP и адаптивных методов подстройки под индивидуальные особенности пользователей (например, RLHF) показало, что персонализация взаимодействия способна существенно повысить эффективность совместной работы человека и искусственного интеллекта.

Тем не менее работа раскрывает лишь часть возможностей предлагаемого гибридного подхода. Дальнейшие исследования должны быть направлены на полномасштабную реализацию динамического взаимодействия между ЛПП и ИИ, включая автоматическую настройку алгоритмов поддержки решений в реальном времени. Особое внимание планируется уделить разработке более точных и детально структурированных моделей внутреннего контекста ЛПП, способных учитывать не только их профессиональные характеристики, но и динамически изменяющиеся факторы, такие как уровень доверия к системе, когнитивная нагрузка и ситуационные предпочтения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-11-00272), <https://rscf.ru/project/24-11-00272/>.

Литература

1. *Das T.K.* Intelligent Techniques in Decision Making: A Survey // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9, no. 12.
2. *He C., Li Y.* A Survey of Intelligent Decision Support System // *Proceedings of the 2017 7th International Conference on Applied Science, Engineering and Technology (ICASET 2017)*. Qingdao, China: Atlantis Press, 2017.
3. *Thiebes S., Lins S., Sunyaev A.* Trustworthy artificial intelligence // *Electron Markets*. 2021. V. 31, no. 2. P. 447–464.
4. *Burgess E.R. et al.* Healthcare AI Treatment Decision Support: Design Principles to Enhance Clinician Adoption and Trust // *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Hamburg Germany: ACM, 2023. P. 1–19.
5. *Jara-Ettinger J.* Theory of mind as inverse reinforcement learning // *Current Opinion in Behavioral Sciences*. 2019. V. 29. P. 105–110.
6. *Кубряк О.В., Ковальчук С.В.* Искусственный сенсорный компонент в системе человек-машина с комбинированной обратной связью // *Проблемы управления*, 2024. № 6. P. 27–37.
7. *Ковальчук С.В., Иредди А.Т.Ш.* Моделирование индивидуальных когнитивных состояний оператора в рамках взаимодействия человек/искусственный интеллект при работе с системами поддержки принятия решений в сложных предметных областях // *Десятая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов*. В двух частях. Часть I. Пятигорск, 2024. С. 147–149.
8. *Kovalchuk S., Lomshakov V., Aliev A.* Human perceiving behavior modeling in evaluation of code generation models // *Proceedings of the 2nd Workshop on Natural Language Generation, Evaluation, and Metrics (GEM)*, 2022. P. 287–294.
9. *Chen M. et al.* Evaluating Large Language Models Trained on Code // *arXiv:2107.03374v2*, 2021. P. 35.
10. *Yin P. et al.* Learning to Mine Aligned Code and Natural Language Pairs from Stack Overflow // *arXiv:1805.08949*, 2018. P. 11.

Способ управления мобильным роботом с использованием механизма формирования ассоциативных связей

А.М. Корсаков, В.В. Иванова, А.А. Демчева

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

Введение

Человек обладает так называемой ассоциативной памятью – способностью соотносить разные воспоминания с одним и тем же фактом или событием. Это фундаментальное свойство присуще не только людям, но и многим видам в животном мире. Возможно, самым известным примером этого свойства являются эксперименты, проведенные И.П. Павловым на собаках, в которых слюноотделение у собаки первоначально определялось предъявлением пищи. Затем, если вид пищи сопровождался звуком (например, звуком колокольчика) в течение определенного периода времени, собака научилась ассоциировать звук с едой, и слюноотделение могло быть вызвано уже одним лишь звуком.

Поскольку ассоциативная память формируется как у животных, так и у людей и широко используется в повседневной жизни, сеть нейронов в нашем мозге должна выполнять такую задачу очень легко. Тогда естественно предположить, что подобное поведение можно воспроизвести в искусственных нейронных сетях (ИНС), что могло бы стать первым важным шагом в реализации функций, напоминающих функции человеческого мозга.

Модели нейронных сетей, способных выполнять такие функции, были предположены в теоретических работах [1, 2]. Однако практическая реализация предложенных в данных работах алгоритмов остается довольно сложной. Причина в том, что нейронная сеть, имитирующая способность к ассоциативной памяти, нуждается в двух важных компонентах: нейронах и синапсах, т. е. связях между нейронами. В случае аппаратной реализации оба эти компонента должны иметь размеры порядка нанометров и потреблять мало энергии, только тогда моделирование с плотностью

человеческого мозга (состоящего примерно из 10^{10} синапсов/см²) может быть осуществимо. Задача аппаратной реализации синапса является сложной в связи с тем, что синапс должен быть гибким («пластичным») в отношении получаемого сигнала. Кроме того, вес синапса должен зависеть от истории всей сети в динамике, и сеть должна хранить непрерывный набор аналоговых значений.

В настоящей работе представлена феноменологическая модель формирования ассоциативных связей, построенная на основе механизма возникновения условного рефлекса (как с положительным, так и с отрицательным подкреплением) у живых существ. В качестве примера технического применения в работе рассматривается обучение мобильного робота выполнению задания с приобретаемой способностью избегать опасных ситуаций.

Сегментная спайковая модель нейрона CSNM и алгоритм ее структурного обучения

В настоящей работе использовалась сегментная спайковая модель нейрона CSNM, особенностью которой является способность к описанию пространственной структуры нейрона (рис. 1). Данная модель описывается системой дифференциальных уравнений, которые приведены в работе [3].

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.

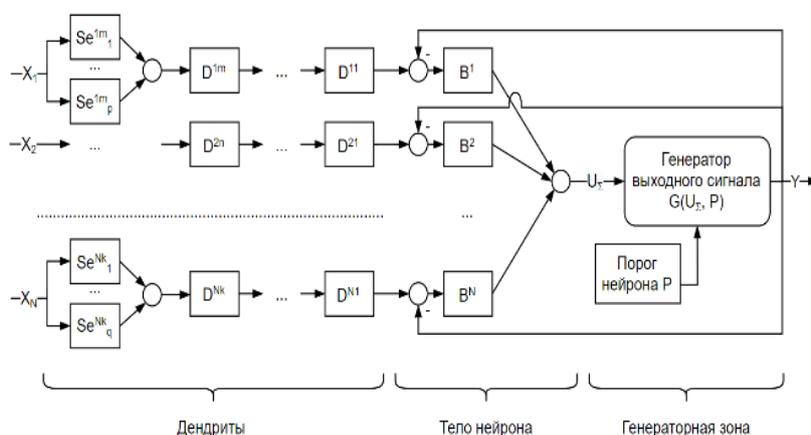


Рис. 1. Структура сегментной спайковой модели нейрона. Se^{lj} – входной синапс l , связанный с сегментом дендрита D^{lj} ; D^{ij} – j -й сегмент i -го дендрита; B^k – k -й сегмент тела нейрона

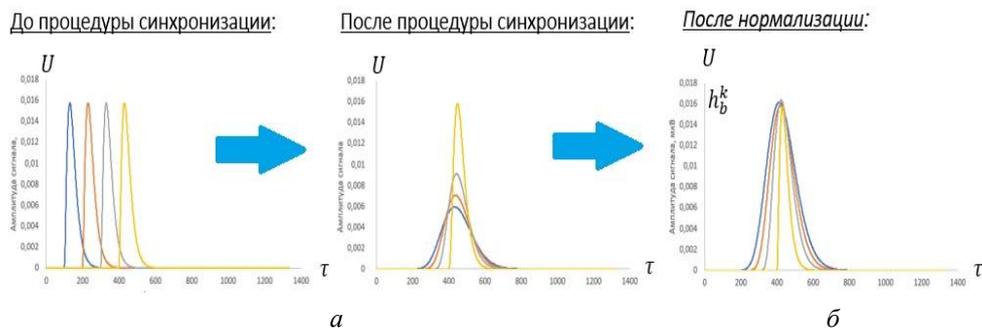


Рис. 2. Структурное обучение модели нейрона: синхронизация (а), нормализация (б)

В данной модели отдельно описываются синапсы, ионные каналы, участки мембраны дендрита и тела клетки, генератор потенциала действия. Однако для получения необходимых свойств модели достаточно изменять лишь три гиперпараметра, определяющих саму структуру нейрона – это размер тела нейрона N_s , вектор длин дендритов N_d и количество тормозных и возбуждающих синапсов на каждом участке мембраны N_{syn} . Таким образом, преимуществом данной модели является её хорошая интерпретируемость, как с точки зрения изменения свойств модели, так и с точки зрения анализа результатов ее работы.

Важной особенностью модели нейрона CSNM является возможность ее структурного обучения. Эта возможность обусловлена следующими свойствами модели:

- возможность создания произвольного числа сегментов тела нейрона, что обеспечивает инвариантность к размерности входного паттерна импульсов;

- возможность независимого наращивания дендритов, увеличение длины (т. е. увеличение числа сегментов) дендрита приводит к временной задержке сигнала и к уменьшению его амплитуды, что позволяет варьировать время прихода отдельных сигналов на тело нейрона;

- возможность добавления произвольного числа синапсов на отдельный участок мембраны; добавление синапса приводит к увеличению амплитуды сигнала, что позволяет варьировать амплитуду отдельных сигналов при их поступлении на тело нейрона;

- отдельно отметим возможность произвольной организации связей (как возбуждающих, так и тормозных) между отдельными элементами нейронов.

В рамках решения задачи структурного обучения работа ведется с паттернами импульсов, под которыми понимается совокупность сигналов, поступающих на входы модели нейрона за выбранный промежуток времени. Отдельный сигнал является импульсом единичной амплитуды. Соответственно, отдельные сигналы в паттерне имеют одинаковую (единичную) амплитуду, но в общем случае – разное время поступления на входы модели. Предполагается, что за выбранный промежуток времени на отдельном входе может быть зафиксировано не более одного импульса.

Для генерации выходного импульса сегментной спайковой моделью нейрона CSNM необходимо превышение значением внутриклеточного потенциала некоторого фиксированного порога. Само значение внутриклеточного потенциала зависит от сигналов на всех входах модели. Для преодоления порога необходимо максимизировать внутриклеточный потенциал на теле нейрона, что может быть достигнуто путем синхронизации действия отдельных сигналов на входах тела нейрона. Это достигается ростом дендритов, входной сигнал на которые приходит раньше. Процедура добавления сегментов дендрита получила название «синхронизация» (рис. 2, а).

Как было указано выше, добавление сегмента дендрита приводит к потере амплитуды сигнала, что компенсируется процедурой «нормализации», которая заключается в добавлении синапсов на последний сегмент дендрита (рис. 2, б). Процедура «нормализации» необходима для возможности выбора фиксированного, единого для всех задач, порога генерации импульсов. Процедуры синхронизации и нормализации составляют обучение модели нейрона. Генерация выходного импульса моделью нейрона является распознаванием паттерна импульсов.

Результаты экспериментальных исследований по структурному обучению модели CSNM представлены в работе [4].

Формирование условного рефлекса с использованием модели нейрона CSNM

Перед тем как перейти к описанию схемы формирования условного рефлекса с использованием сегментной спайковой модели нейрона, необходимо отметить, что данная модель позволяет строить логические элементы, причем с использованием всего одного нейрона [5, 6].

Рассмотрим теперь схему формирования условного рефлекса (рис. 3) [5].

Поскольку далее в статье будет рассмотрен пример использования предложенной схемы в технических приложениях, пояснение представленной на рис. 3 схемы приведем в технической интерпретации. В таком случае предлагаемую схему формирования условного рефлекса можно рассматривать в качестве нейроморфного элемента информационно-управляющей системы робототехнического агента.

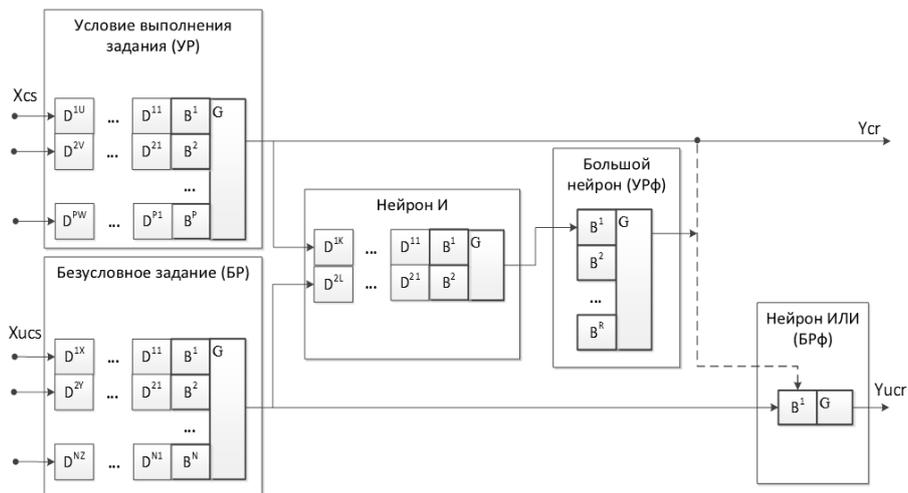


Рис. 3. Схема формирования условного рефлекса на модели CSNM

В простейшем случае такой элемент можно построить на пяти нейронах CSNM. Первый из них, отвечающий безусловному заданию (безусловный раздражитель), обучен распознаванию некоторого стимула и при инициализации связывается со вторым нейроном, который, с одной стороны, отвечает за безусловную реакцию, а с другой – является нейроном «ИЛИ».

В сети также присутствует нейрон, отвечающий условию, при котором выполняется задание (условный раздражитель), который также обучен распознаванию своего стимула. Выходы этих двух нейронов подаются на вход нейрона, реализующего функцию логического «И».

Выход же нейрона «И» подается на вход нейрона, который моделирует образование ассоциативной связи (рефлекторной дуги) и был назван «большим нейроном». Первоначально, при поступлении входного импульса на этот нейрон, изменения внутриклеточного потенциала оказываются недостаточно для генерации выходного импульса. Однако поступление каждого нового импульса приводит к добавлению синапса на единственный дендрит «большого нейрона». Таким образом, через некоторое время (определенное размером нейрона), амплитуды внутриклеточного потенциала оказываются достаточно для реакции «большого нейрона». Реакция же «большого нейрона» служит сигналом к замыканию ключа, который обозначен на рис. 3 пунктирной линией.

В результате, для вызова безусловной реакции достаточно лишь возникновения условия выполнения задания (условного раздражителя), что и означает завершение формирования ассоциативной связи (условного рефлекса) с положительным подкреплением. Для формирования же ассоциативной связи с отрицательным подкреплением необходимо при замыкании ключа создавать не возбуждающую, а тормозную связь. В этом случае при активности условия отмены задания (условного раздражителя), безусловной реакции происходить не будет, даже при наличии безусловного задания (безусловного раздражителя).

Постановка задачи

Рассмотрим способ управления мобильным роботом (МР) с использованием механизма формирования ассоциативных связей на простейшем примере (рис. 4).

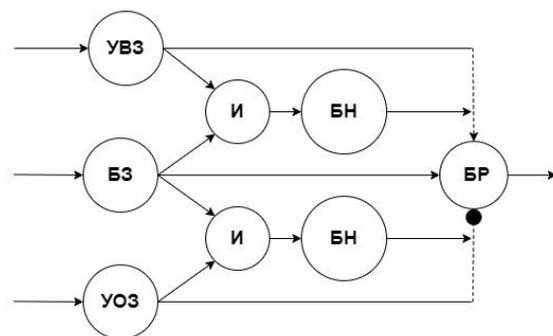


Рис. 4. Механизм формирования ассоциативных связей

На рис. 4: УВЗ – условие выполнения задания (условный раздражитель); УОЗ – условие отмены задания (безусловный раздражитель); И – нейрон, реализующий функцию логического «И»; БН – «большой нейрон» (см. предыдущий раздел); БР – безусловная реакция. Стрелками на схеме обозначены возбуждающие связи; черной точкой – тормозная связь.

Предлагается следующий способ управления мобильным роботом с использованием схемы на рис. 4. Первоначально управление роботом осуществляется оператором. При выполнении определенных внешних условий (УВЗ) оператор выдает соответствующую команду (либо сценарий) БЗ. Безусловной реакцией робота является исполнение данной команды (БР). С другой стороны, возникновение иных внешних условий (УОЗ) приводит к экстренной отмене/изменению команды оператором.

Предполагается, что мобильный робот оснащен набором сенсоров, позволяющих оценивать определяющие признаки возникновения тех или иных условий. В таком случае, в процессе ручного управления после некоторого, определенного размера «больших нейронов» (БН) числа возникновения тех или иных условий, мобильный робот

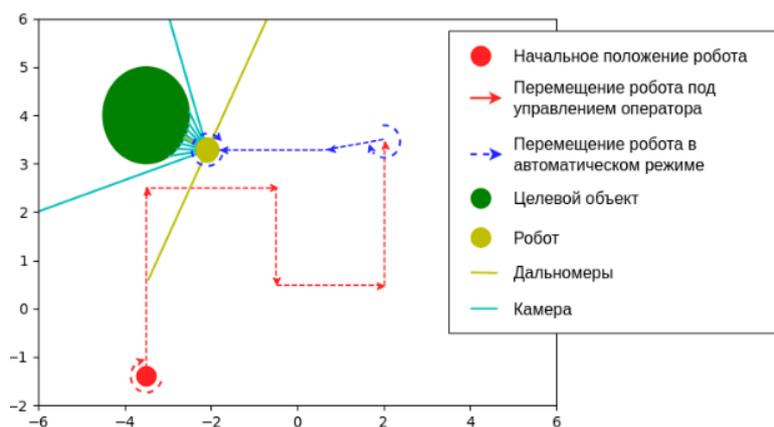


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования

приобретает способность самостоятельно как формировать определенную команду (сценарий) лишь при наличии соответствующих внешних условий (УВЗ), так и блокировать выполнение команды лишь при возникновении условий отмены задания (УОЗ).

Одним из наиболее показательных примеров возможного применения данной схемы является эксплуатация мобильного робота в условиях, подразумевающих возможность потери связи с оператором.

В рассмотренных ниже экспериментах использовалось лишь по одному нейрону УВЗ, БЗ и УОЗ. Однако возможность масштабирования данной схемы представляется очевидной.

Эксперименты на компьютерной модели и на реальном роботе

При проведении компьютерного моделирования использовался специально разработанный эмулятор на языке Python (рис. 5).

На рис. 5 текущее положение МР обозначено желтой точкой, начальное – красной. Необходимо отметить, что при компьютерном моделировании МР рассматривался в качестве материальной точки, что считалось достаточным на данном этапе исследования. На МР установлена видеокамера, угол обзора которой на рис. 5 обозначен голубым цветом, и три дальномера, измерения которых обозначены желтым. Предполагается, что МР способен тем или иным образом распознавать целевой объект (обозначен на рисунке зеленым).

На первом этапе МР под управлением оператора совершал вращательное движение до тех пор, пока в поле зрения камеры не оказывался целевой объект (УВЗ на рис. 4). После чего оператор давал команду (БЗ на рис. 4) прямолинейного движения на объект, которую МР безусловно выполнял (БР на рис. 4). При опасном приближении к целевому объекту (УОЗ на рис. 4) оператор изменял команду на вращение, с дальнейшим уведением МР на «безопасную» дистанцию. Траектория МР, соответствующая данному этапу эксперимента, обозначена на рис. 5 красными стрелками.

В результате выполнения первого этапа эксперимента формировались ассоциативные связи

(положительная и отрицательная), обозначенные на рис. 4 пунктирными отрезками. После чего МР переводился в автоматический режим, что может интерпретироваться как ситуация, когда происходит потеря связи между МР и оператором.

Таким образом, на втором этапе эксперимента МР повторял действия первого этапа, но уже в автоматическом режиме. Соответствующая данному этапу траектория МР обозначена на рис. 5 синими стрелками.

Результаты экспериментов на компьютерной модели были воспроизведены и на реальном МР. Эксперимент проводился с использованием робототехнической платформы «Omegabot» и установленного на нем микрокомпьютера Orange Pi 5 Plus 32 G. Для проведения измерений использовались датчики дальности ToF VL53L1X и видеокамера RealSense D435. Для распознавания объектов на сцене использовалась YOLOv8s.

Результаты натурного эксперимента представлены на рис. 6.

На первом этапе эксперимента (рис. 6, А–В) МР управлялся оператором. Начальная ориентация МР была выбрана так, чтобы целевой объект (обведен зеленой окружностью на рис. 6) находился сзади МР. Оператор подавал команду на вращение МР (рис. 6, А) до тех пор, пока целевой объект не оказывался в центре изображения, полученного с видеокамеры, установленной на МР. Момент распознавания целевого объекта обозначался включением синего светодиода (розовая рамка на рис. 6, Б). После чего оператором подавалась команда на движение МР вперед (рис. 6, Б). С целью предотвращения столкновения с целевым объектом на некотором, принятом «опасным», расстоянии, команда движения вперед изменялась на вращение (рис. 6, В). Далее МР отводился оператором на условно начальную позицию.

Первый этап эксперимента завершался переводением МР в автоматический режим, после чего начинался второй этап эксперимента (рис. 6, Г–Е).

На втором этапе в автоматическом режиме МР совершал вращение до обнаружения в кадре целевого объекта (рис. 6, Г); двигался в направлении целевого объекта (рис. 6, Д); прекращал движение при достижении «опасного» расстояния и начинал вращение (рис. 6, Е). Момент детекции «опасного»

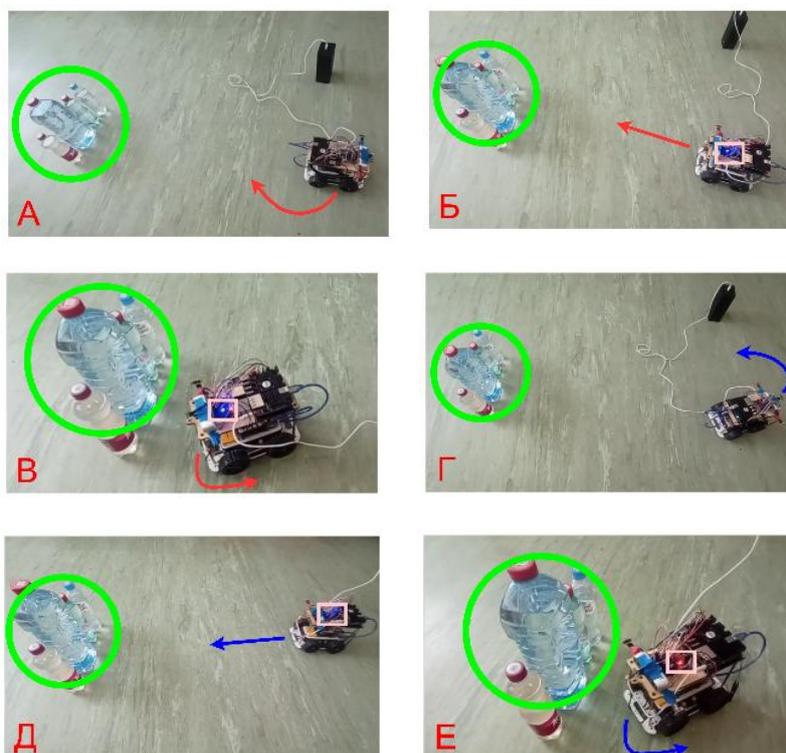


Рис. 6. Результаты натурального эксперимента на МР

расстояния до целевого объекта обозначался включением красного светодиода (розовая рамка на рис. 6, E).

Таким образом, требуемое поведение МР было воспроизведено как на компьютерной модели, так и на реальном мобильном роботе.

Еще раз подчеркнем, что в работе приведены результаты лишь эксперимента на элементарном, легко реализуемом в лабораторных условиях, примере. Однако количество определяемых роботом «желаемых» и «опасных» пар «ситуация»/«действие» может быть легко масштабируемо и ограничено лишь набором сенсоров и способностью с высокой точностью распознавать требуемую ситуацию.

Заключение

В статье представлен способ управления мобильным роботом с использованием механизма формирования ассоциативных связей. При движении под управлением оператора робот приобретает способность самостоятельно как формировать определенную команду лишь при наличии соответствующих внешних условий, так и блокировать выполнение команды лишь при возникновении условий отмены задания. Одним из наиболее очевидных примеров возможного применения данной схемы является эксплуатация мобильного робота в условиях, подразумевающих возможность потери связи

с оператором. Приведены результаты экспериментов на компьютерной модели и реальном роботе.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00553-25-00 от 25.12.2024 «Исследование методов организации навигации роботов в сложных недетерминированных средах на базе теории когнитивного представления пространства» (FNRG-2025-0007 1024050200005-9-1.2.1;2.2.2).

Литература

1. Cooper L.N. Memories and memory: a physicist's approach to the brain // International journal of modern physics A. WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING CO PTE LTD, 2000. V. 15, no. 26. P. 4069–4082.
2. Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // Proceedings of the national academy of sciences. National Acad. Sciences, 1982. V. 79, no. 8. P. 2554–2558.
3. Бахшиев, А.В. Сегментная спайковая модель нейрона CSNM / А.В. Бахшиев, А.А. Демчева // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 3. С. 299–310.
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. Реализация поведенческих функций на спайковых нейронных сетях / А.М. Корсаков, А.В. Бахшиев, Л.А. Астапова, Л.А. Станкевич // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20, № 3. С. 590–621.
6. Корсаков А.М. Применение сегментной спайковой модели нейрона со структурной адаптацией для решения задач классификации / А.М. Корсаков, Л.А. Астапова, А.В. Бахшиев // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21, № 3. С. 493–520.

Проба Вальсальвы как экспериментальная модель стресса

А.А. Красильникова¹, М.К. Паренко², С.Б. Парин¹, С.А. Полевая^{1,2}

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
kras.aa@inbox.ru

²АНО высшего образования «Университет НЕЙМАРК»; parenko.mk@gmail.ru

Проба Вальсальвы (ПВ) – это диагностический прием, заключающийся в форсированном выдохе через сопротивление, что приводит к формированию последующих физиологических реакций. В настоящее время ПВ является универсальным приемом, используемым в оториноларингологии [1], кардиологии [2], неврологии [3], урологии [4], офтальмологии [5], флебологии [6], спортивной медицине [7]. Такое широкое применение ПВ вызвано множественным воздействием этой пробы на организм человека.

При выполнении ПВ у человека возникает повышение внутригрудного и внутрибрюшного давления, гипоксемия, гиперкапния и развивается сложный гемодинамический ответ, в формировании которого вовлечены баро- и хеморецепторы сердечно-сосудистой и дыхательной систем, центральные и периферические структуры нервной системы. Человек в ПВ должен прикладывать усилия для правильного выполнения пробы и при этом испытывает дискомфорт от самой процедуры 5–20-секундного натуживания. Таким образом, ПВ сочетает физический стресс, связанный с гипоксемией и гиперкапнией из-за натуживания, и эмоциональный стресс, обусловленный тревогой от повторяющихся эпизодов натуживания и ожидания дискомфорта.

Стресс является неспецифической системной стадийной физиологической реакцией организма на повреждение или его угрозу [8] и играет ключевую роль в развитии множества соматических и неврологических заболеваний. Стресс как хроническое психофизиологическое перенапряжение может провоцировать манифестацию или обострение симптомов болезни, служить одним из факторов риска или усугублять тяжесть течения многих заболеваний, включая гипертоническую болезнь, инсульты, инфаркты, онкопатологию и др. [9].

Развитие трехкомпонентной теории стресса [8] остается актуальной проблемой физиологии, включая разработку доступных экспериментальных моделей стресса. Обоснование возможности использования пробы Вальсальвы в качестве экспериментальной модели стресса и было целью настоящей работы.

Для детектирования стресса использовалась автоматизированная экспертная система – событийно связанная телеметрия ритма сердца, обладающая аппаратными, алгоритмическими и программными ресурсами для обнаружения ранних биомаркеров стресса в режиме реального времени. Технология обеспечивает непрерывный продолжительный сбор, передачу, накопление и предобработку синхронизированных по времени кардио-

ритмографических записей. Определение момента стресса осуществляется автоматически по характерным изменениям нативной кардиоинтервалограммы и динамике ее расчетных параметров: падению общей мощности спектра variability сердечного ритма (TP) на фоне резкого возрастания индекса симпатовагусного баланса (LF/HF) [10]. Детектирование стресса по данным показателям основано на положениях трехкомпонентной теории нейрохимических механизмов стресса [11, 12].

Для проведения ПВ использовалось оборудование (ООО «Нейрософт»), в состав которого входят манометр, мундштук, соединительная трубка, устройство для стравливания воздуха, обеспечивающее небольшую утечку воздуха из системы при натуживании. Контроль дыхания по время ПВ осуществляли с помощью реабилитационного психофизиологического комплекса «Реакор», оснащенного поясным тензометрическим датчиком (НПКФ «Медиком МТД»).

Для достижения поставленной цели классическая ПВ была модифицирована. Пробу проводили последовательно три раза с длительным натуживанием (по 20 с) и отдыхом в 1 мин между пробами.

ПВ проводилась в положении сидя с опорой на спинку стула. Испытуемый был проинструктирован по команде «Старт» сделать обычный вдох и начать с усилием выдыхать в мундштук, присоединенный к манометру, удерживая давление в 40 мм рт. ст. По команде «Стоп» – прекратить натуживание и начать дышать спокойно. Контроль дыхания и ССТРС проводили непрерывно: не менее 5 мин до ПВ, во время и после ПВ. Время проведения исследования составляло 14 мин (5 мин + 4 мин + 5 мин).

У испытуемых определялись следующие параметры:

- рекурсия дыхания – амплитуда сигнала тензометрического датчика, пропорциональная степени его растяжения (РД, у. е.);

- эпизоды острого стресса (ЭС) до, во время и после ПВ, детектируемые во время проведения ССТРС (ЭС-фон до, ЭС-ПВ, ЭС-фон после, шт.).

Эпизоды стресса на границе ПВ с фоном до и после пробы отнесены к ПВ.

Статистическую обработку результатов проводили при помощи программ Microsoft Excel и Statistica 10 с использованием непараметрического критерия (U-критерий Манна-Уитни).

В исследовании приняли участие 11 испытуемых (8 женщин и 3 мужчин) в возрасте 18–26 лет.

Контроль дыхания проводился у 6 испытуемых. Наличие изменений зафиксировано у всех испытуемых. Установлено, что величина рекурсии

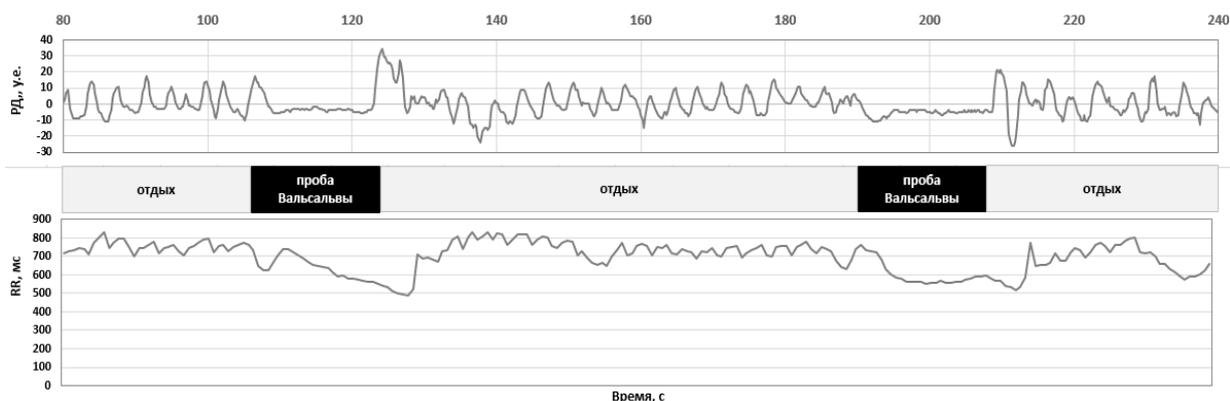


Рис. 1. Влияние пробы Вальсальвы на дыхание и RR-интервалы у испытуемого № 4 (фрагмент записи)

дыхания во время выдоха с натуживанием ниже, чем до и после него ($p < 0,05$). ПВ снижает дыхательную функцию, что провоцирует формирование гипоксемии и гиперкапнии.

На рис. 1 отражен типичный характер изменения дыхания при ПВ и динамики RR-интервалов у испытуемого № 4 на примере двух проб Вальсальвы. На кардиоритмограмме видно, что при каждой ПВ формируется симпатoadренальная стадия стресса, проявляющаяся в нарастании тахикардии в ответ на гипоксемию и гиперкапнию, формирующиеся на фоне выдоха с натуживанием. Тахикардия достигает своего максимума и быстро сменяется резко выраженной брадикардией, что, в соответствии с трехкомпонентной теорией стресса, обусловлено действием эндогенной опиоидной системы, которая, блокируя эффекты симпатической нервной системы, приводит к проявлению эффектов парасимпатической нервной системы [11, 12].

Установлено, что количество эпизодов стресса и их общая продолжительность при ПВ больше, чем до и после ПВ ($p < 0,05$). Количество эпизодов стресса и их общая продолжительность до и после ПВ статистически значимо не различаются ($p = 0,78$, $p = 0,53$ соответственно) (рис. 2).

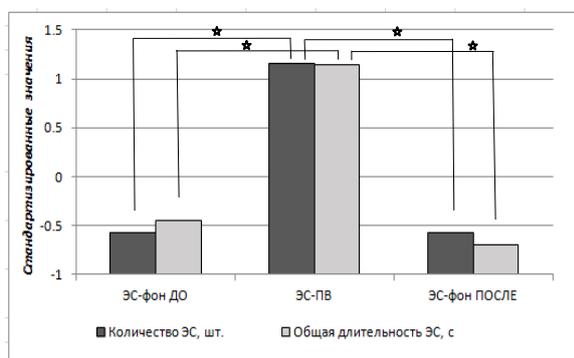


Рис. 2. Влияние пробы Вальсальвы на количество и продолжительность эпизодов стресса (ЭС)

Представленные результаты позволяют заключить, что ПВ возможно использовать в качестве экспериментальной модели стресса. Кроме того, ПВ можно использовать для персонализированной оценки активности симпатoadренальной

системы, эндогенной опиоидной системы, парасимпатической нервной системы и, в перспективе, для диагностики наркотической зависимости.

Литература

1. Пальчун В.Т., Магомедов М.М., Лучихин Л.А. Оториноларингология: национальное руководство. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2022. 1024 с.
2. Felker G.M., Cuculich P.S., Gheorghide M. The Valsalva maneuver: a bedside “biomarker” for heart failure // Am. J. Med. 2006; 119(2):117–22.
3. Low P.A. Autonomic nervous system function // J. Clin. Neurophysiol. 1993 Jan.; 10(1):14–27.
4. Пушкарь Д.Ю., Камалов А.А. Клиническая урология. М. : МИА, 2020.
5. Heimann S., Stodtmeister R., Pillunat L.E., Terai N. The retinal venous pressure at different levels of airway pressure. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol. 2020. Nov; 258(11):2419–2424.
6. Eklöf B. et al. American Venous Forum International Ad Hoc Committee for Revision of the CEAP Classification. Revision of the CEAP classification for chronic venous disorders: consensus statement // J. Vasc Surg. 2004. Dec; 40(6):1248–52.
7. Методики исследования в целях врачебно-летной экспертизы под общ. ред. нач. службы авиационной и космической медицины к.м.н. Е.С. Брежнова и председателя ЦВЛК к.м.н. П.Л. Слепенкова. М. : Воениздат., 1995. 455 с.
8. Парин С.Б. Стресс, боль и опиоиды. Об эндорфинах и не только. Минск : Дискурс, 2021. 208 с.
9. Некрасова М.М., Полевая С.А., Парин С.Б., Шущалов И.С., Бахчина А.В. Способ определения стресса. Патент РФ 2531443. 2014. Nekrasova M.M., Polevaya S.A., Parin S.B., Shishalov I.S., Bakhchina A.V. Method for diagnosing stress. Patent RU 2531443. 2014.
10. 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; 11(1): 109–115.
11. Парин С.Б. Люди и животные в экстремальных ситуациях: нейрохимические механизмы, эволюционный аспект // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия Психология. 2008; 2(2): 118–135.
12. Парин С.Б., Ветюгов В.В., Бахчина А.В., Полевая С.А. Роль эндогенной опиоидной системы в управлении вариабельностью сердечного ритма в контексте когнитивных нагрузок разного уровня // Современные технологии в медицине. 2014; 6(4): 116–126.

Популяционная динамика неврожденной информации

О.А. Кузенков

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

Цель настоящего исследования состоит в исследовании динамики неврожденной информации в популяции постоянной численности. Рассматриваются процессы передачи такого вида информации от особи к особи путем обучения и подражания, а также ее деградация. Исследуется вопрос конкурентоспособности такого вида информации в зависимости от параметров модели.

Важнейшую роль в поведении человека играет неврожденная информация, то есть информация, которая не наследуется на генетическом уровне, а приобретается в результате индивидуального опыта и передается от индивида к индивиду в результате обучения и подражания. Такую информацию принято называть культурной. Примером такого вида информации является язык общения. Актуальность изучения подобной информации, процессов ее передачи, сохранения и утраты возрастает в связи с разработкой сложных самоорганизующихся человекоподобных систем искусственного интеллекта. Появление научного интереса к подобным процессам связано с основополагающими работами Р. Докинза, который по аналогии с геном ввел понятие единицы «культурной» информации – мема [1].

Для того чтобы объяснить закономерности и построить количественные прогнозы динамики передачи «культурной» информации, в настоящее время широко применяется компьютерное моделирование. Например, использование агентного клеточного моделирования позволило достаточно точно описать процессы возникновения первых земледельческих цивилизаций [2]. Наряду с этим актуальными являются традиционные (компарментные) модели, построенные на основе систем дифференциальных уравнений [3]. Например, модель языковой динамики Абрамса – Строгатса дала возможность прогнозировать исчезновение одного из языков в двуязычных сообществах (языковую смерть) [4].

Модели такого типа являются обобщениями классических популяционных моделей Вольтерры – Лотки [5]. В них рассматривается динамика численностей актуальных носителей разных видов культурной информации, а также динамика потенциальных носителей, не обладающих такой информацией в текущее время. При построении модели используется обобщение известной гипотезы эффективных встреч (закона действующих масс) – считается, что эффект передачи информации от актуального носителя к потенциальному пропорционален произведению численностей актуальных и потенциальных носителей информации. До известной степени такие модели идентичны уравнениям Кермака – МакКендрика, описы-

вающим распространение инфекции в популяции [6].

Эмпирические наблюдения показали, что модель становится существенно точнее, если предполагать дополнительную зависимость коэффициента пропорциональности от численностей [7]. Фактически эта модернизация привела к появлению показателя волатильности в модели Абрамса – Строгатса [8]. Аналогично в популяционных биологических моделях уточнение достигается переходом от гипотезы эффективных встреч к гипотезе насыщения Холлинга – Теннера [9, 10]. Такая зависимость коэффициента пропорциональности может отражать когнитивные особенности восприятия информации в многозадачных режимах, рассмотренные в [11, 12], или закономерности возбуждения и торможения, происходящие в нейронных сетях [13, 14].

Одним из основных видов неврожденной информации является поведенческая парадигма, навык и склонность к реализации определенного типа поведения, не закрепленного жестко на генетическом уровне. В частности, такой парадигмой является сознательная кооперация, взаимопомощь индивидов. Эта информация отражается и накапливается в системе поведенческих критериев [15]. Взаимопомощь, снижение конкуренции между индивидами является важнейшим условием, обеспечивающим передачу всех остальных типов культурной информации и сохранение ее тем самым в популяции.

При изучении вопросов динамики неврожденной информации центральное значение имеет оценка ее конкурентоспособности, позволяющая сравнивать между собой разные виды информации с точки зрения устойчивого сохранения их в данной популяции или прогнозировать вытеснение одного вида информации другим [16]. Построение такой функции является частным случаем методики вывода функции приспособленности (фитнеса) в системах с наследованием [17]. Математической основой этой методики в самом общем случае является анализ систем динамики меры [18–20].

Целью настоящего исследования является изучение динамики носителей ненаследственной парадигмы взаимопомощи. Рассматривается популяция индивидов, для простоты предполагается, что численность популяции не меняется во времени. Пусть z – доля носителей парадигмы взаимопомощи (коллективистов) в популяции, v – доля индивидов, не реализующих парадигму взаимопомощи (индивидуалистов). Кроме того, считается, что в популяции есть индивиды (приспособленцы), которые осуществляют взаимопомощь

принудительно под воздействием носителей этой парадигмы, их доля обозначается как $y \equiv 1 - z - v$. Динамика этих величин удовлетворяет следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} z' &= czv + dyz - rz, \\ y' &= szv - dyz - ky + rz, \\ v' &= -czv - szv + ky. \end{aligned}$$

Здесь предполагается, что распространение неврожденной стратегии взаимопомощи осуществляется в соответствии с гипотезой эффективных встреч. Величина c – коэффициент эффективности передачи парадигмы взаимопомощи от коллективистов к индивидуалистам, d – коэффициент эффективности передачи парадигмы от коллективистов к приспособленцам, s – коэффициент эффективности принудительного воздействия коллективистов на индивидуалистов, вынуждающего осуществлять коллективное поведение. Также считается, что имеет место процесс деградации – отступления от кооперативного поведения, связанного как с обновлением популяции, так и с известным «парадоксом заключенных». Величина r – коэффициент деградации коллективистов до приспособленцев, k – коэффициент деградации приспособленцев до индивидуалистов. Данная модель является частным случаем системы на стандартном симплексе [5]. Также ее можно рассматривать как обобщение эпидемиологической модели SIS [21].

В результате проведенного исследования с оценкой функции конкурентоспособности установлено, что условие гарантированного сохранения в сообществе кооперативного поведения состоит в выполнении неравенства $c > r$. В этом случае система имеет нетривиальное устойчивое состояние равновесия. В частности, при $d = c$ координаты такого состояния имеют вид

$$\begin{aligned} z^* &= 1 - r/c, \\ v^* &= rk(ck + (c + s)(c - r))^{-1}, \\ y^* &= v^*(c + s)(c - r)/ck. \end{aligned}$$

Рассмотрим ситуацию, когда коэффициенты модели зависят от состояния системы, то есть

$$\begin{aligned} c &= c_0(1 + \alpha_1 z + \beta_1 y + \gamma_1 v), \\ d &= d_0(1 + \alpha_2 z + \beta_2 y + \gamma_2 v), \\ s &= s_0(1 + \alpha_3 z + \beta_3 y + \gamma_3 v), \\ r &= r_0(1 + \alpha_4 z + \beta_4 y + \gamma_4 v), \\ k &= k_0(1 + \alpha_5 z + \beta_5 y + \gamma_5 v), \end{aligned}$$

где $c_0, d_0, s_0, r_0, k_0, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = 1, \dots, 5$ – фиксированные константы. Коэффициенты $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = 1, \dots, 5$ отражают влияние групп, осуществляющих разные типы поведения, на скорости протекающих процессов распространения или утраты информации. Эти коэффициенты могут иметь разные знаки в зависимости от характера влияния – усиливающего или снижающего соответствующий процесс. Так, например, α_1 может соответствовать повышению привлекательности перехода к кол-

лективному поведению из-за выигрыша, который получает сообщество в результате его осуществления.

Для такой модели доказано, что гарантированное сохранение парадигмы коллективного поведения возможно при выполнении неравенства

$$c_0(1 + \gamma_1) > r_0(1 + \gamma_4).$$

Коэффициент γ_1 соответствует влиянию индивидуалистов на скорость распространения парадигмы коллективного поведения. Как правило, он является отрицательным. Он связан с психологическим порогом восприятия новой информации, идущей вразрез с наличным опытом [11]. Он также может отражать уровень противостояния, вражды и отторжения между группами индивидуалистов и коллективистов. Коэффициент γ_4 соответствует влиянию индивидуалистов на скорость деградации коллективистов. Этот коэффициент обычно является положительным, что говорит о разлагающем воздействии индивидуалистического окружения на носителей коллективистской парадигмы. Установленное неравенство означает, что важнейшим фактором в сохранении парадигмы коллективного поведения, кроме базовых коэффициентов c_0 и r_0 , являются степени влияния индивидуалистов на процесс восприятия этой парадигмы и на процесс утраты ее носителями. То есть для сохранения неврожденного коллективного поведения в популяции следует в первую очередь снизить противостояние между актуальными и потенциальными носителями парадигмы, уменьшить уровень вражды, неизбежно существующей при индивидуалистическом поведении, чтобы снизить порог отторжения нового способа поведения, нового «взгляда на общество», а также снизить уровень разлагающего влияния индивидуализма на сообщество.

Далее был рассмотрен усложненный вариант модели. К имеющимся трем группам была добавлена еще одна, представители которой осуществляют только силовое воздействие на индивидуалистов с целью заставить принудительно осуществлять коллективное поведение. При этом члены этой группы также не являются носителями коллективистской парадигмы в полном смысле, подобно приспособленцам. Поэтому они не могут передавать ее другим членам сообщества. Вместо этого они могут привлекать индивидуалистов в свою группу. Доля четвертой группы в популяции обозначена x . В наиболее простой форме модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} z' &= czv + cyz + cxz - 2rz, \\ x' &= rz - cxz + exv - rx, \\ y' &= szv - cyz - ry + rz, \\ v' &= -czv - szv + ry - exv + rx. \end{aligned}$$

Здесь предполагается, что коэффициенты деградации r у всех групп одинаковы, коэффициенты c передачи коллективистской парадигмы от ее носителей к членам других групп также одинаковы, и дополнительно имеет место переход индивидуали-

листов в четвертую группу, в соответствии с гипотезой эффективных встреч и коэффициентом эффективности e .

Анализ этой модели показывает, что парадигма коллективистского поведения гарантированно сохраняется в популяции при выполнении неравенства $c > 2r$. Однако, если данное неравенство не выполняется, здесь необязательно происходит вырождение сообщества в популяцию индивидуалистов $v = 1$. Если дополнительно выполняется неравенство $e > r$, то система стремится к другому устойчивому состоянию равновесия:

$$z = 0, v = r/e, x = (e - r)/(e + s),$$

$$y = s(e - r)/(e + s)e.$$

Такой результат можно интерпретировать как вырождение сообщества в систему, основанную только на принудительной кооперации. Здесь введенная четвертая группа реализует аппарат принуждения.

Представленная модель была также исследована с учетом влияния групп сообщества на скорость протекания процессов передачи и утраты неврожденной информации. При этом рассматривались следующие зависимости коэффициентов системы от фазовых координат

$$c = c_0(1 + \alpha_1 z + \beta_1 y + \gamma_1 v + \delta_1 x),$$

$$s = s_0(1 + \alpha_3 z + \beta_3 y + \gamma_3 v + \delta_3 x),$$

$$r = r_0(1 + \alpha_4 z + \beta_4 y + \gamma_4 v + \delta_4 x),$$

$$e = e_0(1 + \alpha_6 z + \beta_6 y + \gamma_6 v + \delta_6 x).$$

С учетом таких зависимостей необходимое условие сохранения ненаследственной парадигмы коллективного поведения состоит в выполнении неравенства

$$c_0(1 + \gamma_1) > r_0(1 + \gamma_4).$$

Если же это условие не выполняется, то условием перехода к принудительной кооперации является следующее неравенство:

$$e_0(1 + \gamma_6) > r_0(1 + \gamma_4).$$

Из последнего неравенства видно, что установление принудительной кооперации зависит от того, насколько привлекательно для индивидуалистов участие в принуждении членов сообщества к ее осуществлению.

Литература

1. Докинз Р. Эгоистичный ген. М. : АСТ:CORPUS, 2013.
2. Turchin P. et al. War, space, and the evolution of Old World complex societies // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2013. 110 (41). 16384–16389.
3. Cortell-Nicolau A. et al. Demographic interactions between the last hunter-gatherers and the first farmers // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2025. V. 122(14). e2416221122.
4. Abrams D., Strogatz S. Modelling the Dynamics of Language Death // Nature. 2003. V. 424. P. 900.
5. Кузенков О.А., Рябова Е.А. Математическое моделирование процессов отбора. Н. Новгород : Издательство ННГУ, 2007.
6. Kermack W.O., McKendrick A.G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. 1927. V. 115, no. 772. P. 700–721.
7. Banerjee M., Tokarev A., Volpert V. Immunological model of two-stage epidemic growth // Mathematical Modelling of Natural Phenomena. 2020. V. 15. P. 24.
8. Медведев А.В., Кузенков О.А. Моделирование конкуренции языков в двуязычном сообществе // Изв. вузов. ПНД. 2024. Т. 32, № 5. С. 691–708.
9. Базыкин Ф.Д. Математическая биофизика взаимодействующих популяций. М. : Наука, 1985.
10. Kot M. Elements of Mathematical Ecology. Cambridge : University Press, 2001.
11. Головина А.А., Яхно В.Г. Упрощенные модели для описания многозадачных режимов в живых распознающих системах // Изв. вузов. ПНД. 2025. Т. 33, вып. 3. С. 361–380.
12. Alexandrova N.S. et al. Bilingualism as an unstable state // Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics. Intercognsci: International Conference on Cognitive Sciences. Cham, 2021. P. 359–367.
13. Bishop C. Pattern Recognition and Machine Learning. New York : Springer, 2016.
14. Mohri M., Rostamizadehm A., Talwalkar A. Foundations of Machine Learning. Cambridge, MA, USA : MIT Press, 2012.
15. Kuzenkov O., Kuzenkova G., Morozov A. Exploring evolutionary fitness in biological systems using machine learning methods // Entropy. 2021. V. 23, no. 1. P. 1–17.
16. Medvedev A.V., Kuzenkov O.A. Competitiveness Function for a Bilingual Community Model // Computer tools in education. 2023. No. 4. P. 17–29.
17. 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.
18. Кузенков О.А. Исследование динамической системы вероятностных мер Радона // Дифференциальные уравнения. 1995. Т. 31, № 4. С. 591–596.
19. Кузенков О.А., Рябова Е.А. Предельные возможности решения управляемой системы с наследованием // Дифференциальные уравнения. 2015. Т. 51, № 4. С. 514–523.
20. Kuzenkov O.A., Novozhenin A.V. Optimal control of measure dynamic // Comm. Nonlinear. Sci. Numer. Simulat. 2015. V. 21 (13). P. 159–171.
21. Андерсон Р., Мэй Р. Инфекционные болезни человека. Динамика и контроль. М. : Мир, 2004.

Система обнаружения вторжений в сетевом трафике на основе алгоритмов машинного обучения

Г.В. Кузенкова, К.А. Лахов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Институт информационных технологий, математики и механики, Нижний Новгород;
kuzenkovagv@mail.ru

Данные мониторинга в области информационной безопасности компании Positive Technologies показывают заметное возрастание киберугроз как в мире, так и в России [1]. В прогнозе развития рынка кибербезопасности до 2028 года, подготовленном Центром цифрового развития (ЦСР), отмечается появление новых трендов в практическом применении таких технологий, как технологии искусственного интеллекта [2]. В условиях растущих киберугроз задача создания систем обнаружения вторжения (intrusion-detection system, IDS) и предотвращения атак (intrusion-prevention systems, IPS) на основе современных технологий является актуальной. Системы обнаружения вторжений и предотвращения атак – это аппаратные и программные решения, предназначенные для защиты сетевой инфраструктуры от несанкционированного доступа и кибератак: IDS предупреждают о начале атак на сеть, а IPS направлены не только на предупреждение, но и блокировку атаки. Системы работают на уровне сети и на уровне хоста, а также применяется гибридный подход [3]. Сетевые IDPS (Network-based IDPS, NIDPS) имеют доступ ко всему трафику в режиме реального времени и отличаются распределенной архитектурой, выявляя подозрительные активности, указывающие на потенциальную атаку или компрометацию сети [4]. Системы анализируют захваченные пакеты, используя различные методы, такие как сигнатурный анализ (SIDS), когда идет сравнение пакетов с известными шаблонами атак (сигнатурами) [5]; статистический анализ для выявления подозрительных паттернов и аномальное обнаружение отклонений от нормального сетевого трафика [6, 7]; гибридные методы [8, 9]. При применении систем *open-source*, основанных на сигнатурах, выявлены недостаточная скорость обнаружения и низкая точность при использовании предустановленных настроек [5]. Совместное использование SIDS может повысить точность или частоту обнаружения, но не оба параметра одновременно. Поэтому необходимо анализировать роль SIDS с открытым исходным кодом и настройками по умолчанию в контексте веб-атак (Snort, ModSecurity и Nemesida). Применением статического метода [6] на основе гауссовского распределения изучается нормальное поведение коммуникационного процесса, проверка соответствия точки данных обученному гауссовскому распределению, что позволяет изучить нормальное поведение коммуникационного процесса и предсказать, подвергается ли узел атаке. Однако в сложных случаях может потребоваться использование нескольких моделей. Большинство совре-

менных исследований в области аномальных систем сосредотачиваются на аспектах применения машинного обучения. Как правило, рассматриваются схемы применения нескольких классификаторов [10, 11] и уменьшения количества входных признаков [9, 12, 13]. Производительность классификаторов оценивается по точности, частоте обнаружения, доле ложных срабатываний и другим показателям. С целью максимизации точности, полноты и общей эффективности системы обнаружения атак в исследованиях делают акцент на тщательной настройке параметров моделей машинного обучения – например таких, как количество слоев, количество нейронов в слоях, коэффициент обучения, функции активации и размер выборки [14, 15]. Современные исследования в области систем обнаружения вторжений в значительной степени сосредоточены на повышении точности и эффективности обнаружения атак путем совершенствования алгоритмов машинного обучения или комбинации методов обнаружения, при этом упускается из виду важный архитектурный аспект практического применения таких систем: захват сетевого трафика и его преобразование в формат, пригодный для подачи на вход нейросетевой модели. Многие исследования используют заранее подготовленные и очищенные датасеты в формате CSV. В реальных условиях именно этот процесс является критическим: без правильно организованного канала передачи данных от системы сетевого мониторинга к модели машинного обучения полноценное развертывание такой системы невозможно.

В данной работе рассматривается реализация модели гибридной системы обнаружения вторжений, основанной на сочетании нескольких компонентов: сигнатурного детектора, модуля передачи данных, аномального детектора (рис. 1). Сигнатурный анализ используется для захвата сетевого трафика и обнаружения вторжений, основные элементы которых уже известны. Модуль обработки данных обеспечивает возможность передачи информации между двумя системами, а также вывод обнаруженных атак на пользовательский интерфейс. Анализ аномалий с помощью аномального детектора позволяет обнаруживать новые потенциально опасные сигнатуры. Пользовательский интерфейс был реализован как пользовательская веб-панель.

На первом этапе предлагаемая гибридная NIDS осуществляет захват сетевого трафика посредством сигнатурного детектора (СД) на основе *open-source* системы Suricata (как лучшего инструмента сигнатурного анализа [16, 17]).

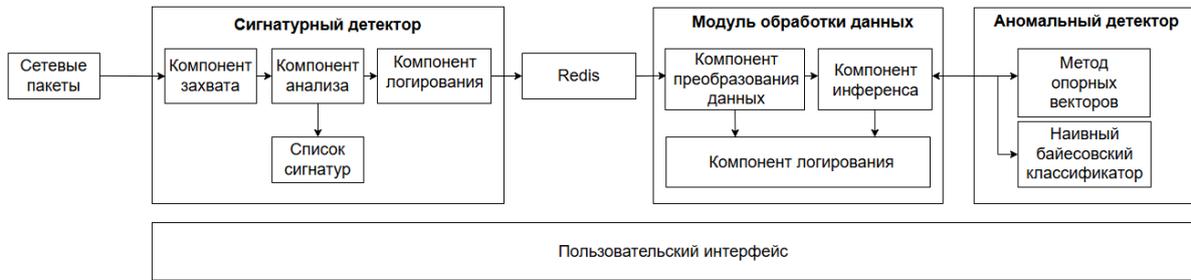


Рис. 1. Модель предлагаемой NIDS

Особенностью использования именно этого инструмента является возможность работать в режиме реального времени, перехватывая трафик напрямую с сетевого интерфейса, а также применения оффлайн-режима, в котором может быть выполнен запуск на заранее записанных файлах сырого трафика формата *.pcap*.

После захвата сетевых пакетов выполняется их сверка с базой сигнатур. Конфигурация включает актуальные сигнатуры для всех поддерживаемых типов атак. Сигнатурный детектор сохраняет данные о сработавших сигнатурах в формате EVE JSON, после чего специализированный парсер извлекает из них релевантную информацию и публикует эти данные в очередь системы управления потоками данных Redis (как инструмент для реализации обмена сообщениями, работающий по принципу *pub/sub*). На следующем этапе специально разработанный модуль обработки данных в режиме реального времени получает сообщения и преобразует их в формат, пригодный для подачи на вход модели машинного обучения.

Модуль обработки данных, разработанный на языке *python*, преобразовывает необработанный сетевой трафик в пригодные для анализа признаки как *json*-объекты. Модуль принимает данные о потоках от сигнатурного детектора и, используя уникальные идентификаторы соединений, объединяет *json*-объекты, относящиеся к одному и тому же потоку. Для каждого соединения агрегируются такие характеристики, как IP-адреса, количество переданных байт и др. Информация из этих объектов группируется за определенный промежуток времени. При этом формируются статистические признаки, отражающие поведение соединения: объем трафика, число пакетов, доля входящих и исходящих данных и другие метрики. В дальнейшем эти признаки используются аномальным детектором для классификации как нормальной, так и вредоносной активности.

Аномальный детектор (АД) в разработанной системе представляет собой модуль, реализующий алгоритмы машинного обучения на основе двух классификаторов, обученных на сетевом трафике из датасета CIC-IDS2018. Этот набор данных включал как нормальный сетевой трафик, так и различные типы атак: DoS, DDoS, Infiltration, Botnet, Web attack, Brute-force. Для набора данных были применены методы предварительной обработки: нормализация, *one-hot* кодирование категориальных признаков. Для корректного сравнения результатов все данные были приведены к единому формату. Датасет CIC-IDS2018 предоставляет

сетевой трафик в виде исходных *.pcap*-файлов, содержащих реальные сетевые взаимодействия. Для создания *.pcap*-файла тестовой выборки были использованы размеченные *csv*-файлы. На основе полей, описывающих параметры каждого соединения, соответствующий сетевой трафик был реконструирован из оригинальных файлов с помощью утилиты *tshark*. Визуализация структуры информации в датасете показала, что атаки типа DoS и DDoS четко отделяются от остальных и формируют отдельные скопления. В то же время Web-атаки, Brute Force и Botnet размещаются ближе друг к другу и частично накладываются на область нормального трафика. Это указывает на сходство их характеристик с признаками обычных соединений, что создает трудности при их точной идентификации.

Для повышения эффективности обучения аномального детектора датасет был разбит на две части. Первая включает все типы атак, а вторая содержит только те, которые имеют наибольшее пересечение с легитимным трафиком: Brute Force, Web Attack и Botnet. Такой подход позволяет детектору лучше адаптироваться к задачам различения сложных, слабо отличимых типов атак. Для двух групп были обучены разные классификаторы: наивный байесовский классификатор (группа 1), метод опорных векторов (SVM) (группа 2).

Сигнатурный детектор запускался с активированным логированием, что позволило зафиксировать все срабатывания на потенциальные угрозы. Из полученных логов были извлечены события, связанные с обнаруженными атаками, после чего данные были преобразованы в формат *csv* для дальнейшей обработки и последующего сопоставления с размеченной информацией из датасета.

Для оценки эффективности разработанной системы обнаружения атак были использованы стандартные метрики качества *precision*, *recall* и *F1-score*. Эти показатели рассчитывались как для каждого из компонентов анализа трафика отдельно (сигнатурного и аномального детекторов), так и для гибридной системы в целом. Такой подход позволил получить более полное представление о вкладе каждого модуля в процесс обнаружения атак и оценить общую результативность предложенного решения.

Сигнатурный детектор продемонстрировал высокие показатели точности при обнаружении наиболее распространенных типов атак, таких как DoS и DDoS, превзойдя по этим метрикам аномальный детектор. Ожидается, что сигнатурный детектор окажется менее эффективным при выявлении

новых или нестандартных атак, для которых отсутствовали заранее заданные сигнатуры. Аномальный детектор уверенно справился с распознаванием DoS и DDoS, что объясняется их выраженными признаками в трафике. Наиболее значимым результатом стало обнаружение менее очевидных атак, таких как Web-attack, Brute Force и Botnet (таблица 1).

Таблица 1

Результаты обнаружения атак детекторами гибридной NIDS

Тип атаки	Precision		Recall		F1 score	
	СД	АД	СД	АД	СД	АД
Benign	0,98	0,94	0,96	0,99	0,97	0,96
Botnet	0,85	0,98	0,80	0,99	0,83	0,98
Brute-force	0,92	0,95	0,89	0,89	0,90	0,92
DDoS	0,98	0,97	0,95	0,96	0,96	0,96
DoS	0,97	0,96	0,94	0,87	0,95	0,91
Infiltration	0,78	0,85	0,74	0,96	0,76	0,90
Web attack	0,89	0,98	0,80	0,82	0,84	0,89

Сравнение результатов разработанной гибридной NIDS с рядом существующих решений (таблица 2) демонстрирует более высокие показатели precision (метрика наиболее часто используется в качестве ключевого показателя в рассмотренных работах по обнаружению атак).

Таблица 2

Сравнение систем обнаружения сетевых атак по метрике precision

Система	Botnet	Brute-force	Web attack
Предлагаемая NIDS	0,986	0,989	0,987
BMRFASTF1 [10]	0,740	0,976	0,880
m-SVM [11]	0,905	0,978	1,000
DLCM [12]	0,935	0,944	0,870
rbf-kernel SVM [13]	0,984	0,984	0,911
DNN [14]	0,880	0,870	0,740
CNN [15]	0,930	0,945	0,980

Гибридный подход показывает, что вероятность обнаружения атаки существенно возрастает в результате одновременного анализа трафика несколькими независимыми модулями. При этом в данной системе были применены два разных классификатора на двух группах данных. Комбинирование классификаторов дает системе возможность как учитывать заранее известные шаблоны атак, так и выявлять ранее неизвестные отклонения (anomaly-based). Это особенно критично при работе с реальным трафиком, где точечная оптимизация одного классификатора может приводить к переобучению или недостаточной обобщающей способности. Предлагаемая архитектура NIDS предполагает непрерывную обработку трафика, возможность интеграции с существующими сетевыми инфраструктурами. Модульная структура системы дает возможность масштабирования решений обнаружения аномальных атак.

Литература

1. Глушко А. Актуальные киберугрозы: IV квартал 2024 года – I квартал 2025 года [сайт компании Positive Technologies]. URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/aktualnye-kiberugrozy-iv-kvartal-2024-goda-i-kvartal-2025-goda/> Дата доступа 21.04.2025.
2. Прогноз развития рынка кибербезопасности в Российской Федерации на 2024–2028 годы. <https://www.csr.ru/upload/iblock/f14/bnl532lqmqd0u23s1fuzw4n3ycm1to1.pdf> Дата доступа 21.04.2025.
3. Системы обнаружения и предотвращения вторжений [Российский интернет-портал и аналитическое агентство TAdviser]. URL: <https://www.tadviser.ru/a/53841> Дата доступа 21.04.2025.
4. Шелухин О.И. Сетевые аномалии. Обнаружение, локализация, прогнозирование. М. : Горячая линия – Телеком, 2019. 448 с.
5. Diaz-Verdejo J., Muñoz-Calle J., Estepa Alonso A., Estepa Alonso R., Madinabeitia G. On the Detection Capabilities of Signature-Based Intrusion Detection Systems in the Context of Web Attacks // Applied Sciences. 2022. V. 12(2). P. 852. <https://doi.org/10.3390/app12020852>.
6. Yu B., Zhang Y., Xie W., Zuo W., Zhao Y., Wei Y. A Network Traffic Anomaly Detection Method Based on Gaussian Mixture Model // Electronics. 2023. V. 12(6). P. 1397. <https://doi.org/10.3390/electronics12061397>.
7. Khan M.M., Rehman M.Z., Khan A., Abusham E. Anomaly detection in network traffic with ELSC learning algorithm. // Electronics Letters. 2024. V. 60(14). P. 13235. <https://doi.org/10.1049/ell2.13235>.
8. Fedorchenko E., Novikova E., Shulepov A. Comparative Review of the Intrusion Detection Systems Based on Federated Learning: Advantages and Open Challenges // MDPI Algorithms. 2022. V. 15(7). P. 247. <https://doi.org/10.3390/a15070247>.
9. Ghani H., Salekzamanikhani S., Virdee B. A hybrid dimensionality reduction for network intrusion detection. Journal of Cybersecurity and Privacy // Journal of Cybersecurity and Privacy. 2023. V. 3(4). P. 830–843. <https://doi.org/10.3390/jcp3040037>.
10. Hassan I.H., Abdullahi M., Aliyu M.M., Yusuf S.A., Abdulrahim A. An improved binary manta ray foraging optimization algorithm based feature selection and random forest classifier for network intrusion detection // Intelligent Systems with Applications. 2022. No. 16. P. 852. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200114>.
11. Adejimi A.O., Sodiya A.S., Ojesanmi O.A., Falana O.J., Tinubu C.O. A dynamic intrusion detection system for critical information infrastructure // Scientific African. 2023. V. 21. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01817>.
12. Magdy M. Fadel, Sally M. El-Ghamrawy, Amr M.T. Ali-Eldin, Mohammed K. A Hybrid Deep Learning Intrusion Detection and Prevention Framework // Computers, Materials and Continua Applications. 2022. No. 73. P. 2293–2312. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.028287>.
13. D'hooge L., Verkerken M., Wauters T., De Turck F., Volckaert B. Characterizing the Impact of Data-Damaged Models on Generalization Strength in Intrusion Detection // Journal of Cybersecurity and Privacy. 2023. V. 73. P. 118–144. <https://doi.org/10.3390/jcp3020008>.
14. Farhan R., Farhan M., Hassan N. Optimized Deep Learning with Binary PSO for Intrusion Detection on CSE-CIC-IDS2018 Dataset // Journal of Al-Qadisiyah for Computer Science and Mathematics. 2022. V. 12. P. 16–27. DOI: 10.29304/jqcm.2020.12.3.706.
15. Saidane S., Telch F., Shahin K., Granelli F. Optimizing Intrusion Detection System Performance Through Synergistic Hyperparameter Tuning and Advanced Data Processing // SSRN. 2024. URL: <https://ssrn.com/abstract=4914947>.
16. Boukebous A.A.E., Fettahe M.I., Bendiab G., Shialees S. A Comparative Analysis of Snort 3 and Suricata // 2023 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET), London, United Kingdom. 2023. P. 1–6. doi: 10.1109/GlobConET56651.2023.10150141.
17. Жуков М.М., Баркалов Ю.М., Телков А.Ю. Методологический подход к имитационному моделированию при исследовании практической эффективности систем защиты от сетевых кибератак // Вестник Воронежского института МВД России. 2022. № 1. С. 24–39.

Моделирование динамики когнитивных процессов у крыс: анализ условно-рефлекторного поведения

И.А. Лазаренко, М.Е. Пупкина, Е.Ю. Ситникова

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва;
lazarenko_ia@ihna.ru

Исследование когнитивных функций крыс в парадигмах негативного подкрепления включает ряд экспериментальных подходов для оценки как исполнительных функций, так и индивидуальных особенностей животных [1–3]. В парадигме обусловливания страхом или условно-рефлекторного активного избегания (УРДИ) крысы подвергаются воздействию стимулов, вызывающих стрессовые реакции или негативные эмоциональные состояния, что позволяет оценить их способность к обучению в условиях, связанных с угрозой или тревогой [1, 2].

Однако стандартные методы исследования УРДИ не учитывают индивидуальные различия в нервной системе животных, такие как [1, 2]

- уровень чувствительности к стрессовым факторам,

- мотивационные характеристики,
- способность к самодисциплине и настойчивости,

- скорость психомоторных реакций.

Кроме того, традиционные методы обычно не принимают во внимание следующее [1, 2]:

- возможные проявления физического истощения у животных в ходе длительных экспериментов,

- индивидуальные эмоциональные реакции на экспериментальные условия,

- вариативность скорости обучения между отдельными особями.

Для более глубокого изучения когнитивных функций у крыс и учета индивидуальных различий можно применять подходы, аналогичные тем, что используются в психофизиологии человека, в частности, т. н. психометрические функции – математическая модель, применяемая в задачах обнаружения и различения стимулов. Она моделирует связь между заданной характеристикой физического стимула, например, скоростью, длительностью, яркостью, весом и т. д., и ответами с выбором животного. В нашем эксперименте сложность задачи оставалась неизменной, но накапливался опыт успешных и неудачных попыток (с точки зрения экспериментатора). Таким образом, психометрическая функция позволяла оценить, как изменялась эффективность выполнения задачи с течением времени, в зависимости от уровня стресса, усталости и накопления опыта. В качестве психометрической функции была выбрана сигмоида. Дополнительно использовали математическую модель, основанную на сумме двух экспонент, где значение функции определялось как время реакции (переход в безопасный

отсек). Одновременное использование двух моделей позволяет учитывать как скорость реакции, так и число успешных избеганий как мер формирования условного рефлекса.

Особое внимание уделяли индивидуальным различиям в обучении, включая скорость выполнения реакции, адаптационные способности и устойчивость к стрессовым воздействиям. Применение методов математического моделирования позволило выявить скрытые закономерности в данных, которые могут быть неочевидны при использовании стандартных методов. Это способствует выявлению индивидуальных стратегий решения задач и адаптации к стрессовым условиям.

Поведенческий эксперимент

Экспериментальная работа была одобрена комиссией по этике ИВНД и НФ РАН. Использовали 67 крыс WAG/Rij обоих полов в возрасте 9–12 месяцев. Тест УРДИ был проведен в челночной камере, состоявшей из двух симметричных отсеков, разделенных стенкой с арочным проходом [3, 4]. Пол камеры был сделан из толстых металлических прутьев, проводящих ток, посредством которого наносили электрокожное раздражение (безусловный стимул – ток минимальной силы, вызывающий пощипывание лап, силой менее 0,5 мА). Силу тока подбирали индивидуально, ориентируясь на реакцию крысы. Крысы были протестированы поодиночке. За 5 мин до начала эксперимента животное размещалось в камере для адаптации. Перед началом тестирования предъявляли условный стимул – звуковой сигнал в течение 30 с. (5 кГц, 70 дБ).

Результаты выполнения теста оценивали, ориентируясь на оценку достижения «критерия обученности»: 5 реакций избегания из 6 предъявлений условного стимула (рис. 1). Особи, достигшие «критерия обученности» за 50 предъявлений, составили категорию «обучившиеся». Особи, не достигшие критерия, – «не обучившиеся».

Цель теста – выработать «реакцию избегания», то есть переход в безопасный отсек в ответ на предъявление звукового стимула в течение 5 с. (рис. 1). Максимальная продолжительность электрокожного раздражения составила 40 с. Каждому животному было предъявлено 50 сочетаний условного и безусловного стимулов. Измеряли продолжительность интервала времени между условным и безусловным стимулами и анализировали динамику этого показателя в процессе выполнения теста.

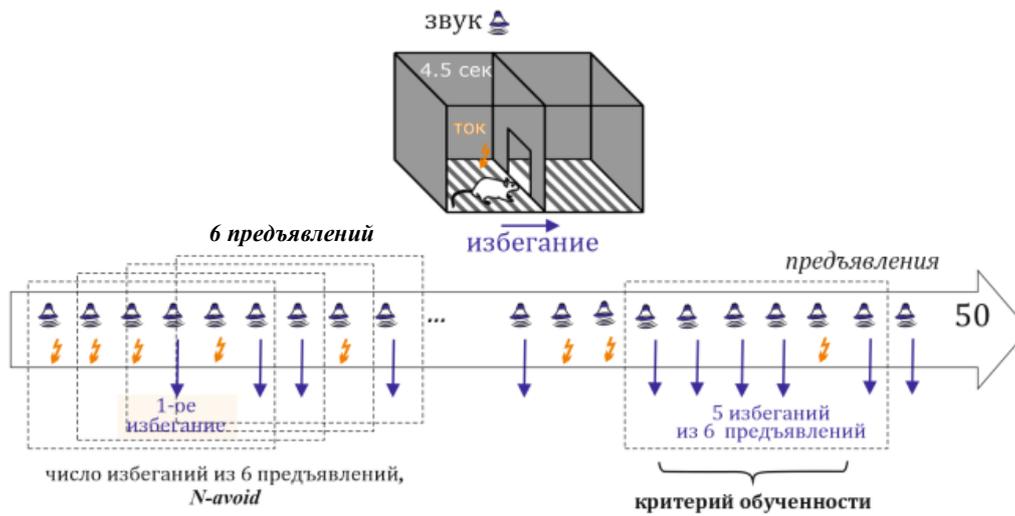


Рис. 1. Схема парадигмы УРДИ. Животному предъявляется условный стимул (звуковой сигнал), через 4,5 секунды – безусловный стимул (электрокожное раздражение). Избеганием считается покидание зоны безусловного стимула до его предъявления. Достижение 5 избеганий в любой непрерывной последовательности из шести предъявлений считали достижением критерия обученности

Самки тестировались строго в фазу диэструса эстрального цикла. Для определения фазы получали влажные вагинальные мазки и проводили микроскопию на предметном стекле в капле физраствора сразу после взятия (прямая цитология, неокрашенный препарат, микроскоп Nikon). Исследование проводили без конденсорной линзы, используя 10-кратный объектив для определения соотношения клеток и 40-кратный для их идентификации. Основным признаком экспресс-анализа мазков было наличие или отсутствие лейкоцитов. Лейкоциты доминируют в стадии диэструса и метэструса, но отсутствуют в проэструсе и эструсе [4].

Моделирование и аппроксимация

Анализ поведения в тесте УРДИ проводили с использованием двух моделей. Первая – сигмоидальная функция (см. формулу (1)). Обычно в психометрии она используется, когда аргументом выступает интенсивность стимула, а результатом – доля исходов, в которых стимул вызывает ответ у испытуемого:

$$\sigma(x) = \frac{k}{1 + e^{-A(x-B)}}, \quad (1)$$

где x – интенсивность стимула, k – максимальная сила ответа (1 для вероятностных моделей), A – коэффициент, прямо пропорциональный коэффициенту C прямой $y(x) = Cx$, параллельной касательной к сигмоиде в точке наибольшего значения производной (или, описывая менее строго, мера наклона сигмоиды), B – значение x , при котором ответ равен половине k .

С точки зрения психофизиологии, параметр A отражает скорость обучения или чувствительность к стимулу. Чем выше A , тем меньше наклон кривой в точке B и тем более пологой становится сигмоида. Можно убрать знак минус, чтобы преобразовать обратную зависимость в прямую. Если A равно нулю, результат не зависит от интенсивности стимула. При A меньше нуля получается

обратная, убывающая сигмоида. Точка B – это точка субъективного равенства, т. е. стимул такой силы, при которой испытуемый не может отличить наличие стимула от его отсутствия (рис. 2, а).

Идея заключалась в разделении случайных угадываний и стабильных реакций УРДИ путем представления обученности как растущего в процессе эксперимента стимула. Для данной задачи метод был адаптирован следующим образом: за x был принят номер попытки, за $\sigma(x)$ – число «правильных ответов» подряд из последних 6 ($k = 6$); в таком случае значение A соответствовало скорости обучения (т. е. скорости перехода от «угадывания» к последовательному и гарантированному избеганию электрокожного раздражения), а B – приблизительный момент перехода от угадывания действия к целенаправленному избеганию.

Для второго подхода мы использовали две экспоненты: одна описывала утомляемость животного, другая – скорость усвоения реакции избегания. Экспоненциальная функция оказалась отличным выбором для аппроксимации влияния этих процессов на обучение, так как она позволяет легко регулировать область значений. Утомление и обученность имели четкие пороговые значения: полное бессилие и моментальное решение задачи. Эти две экспоненты представлены формулой

$$t(x) = ke^{-\frac{x}{A}} + e^{\frac{x}{B}}, \quad (2)$$

где $t(x)$ – время, затраченное на выполнение задачи избегания, k – коэффициент, приблизительно равный времени, необходимому для решения задачи абсолютно необученным животным (в данном случае – 40 с), A и B – коэффициенты скорости обучения и уставания соответственно. Видно, что первая экспонента по мере увеличения x стремится к 0, а вторая – к бесконечности (рис. 3, а).

Аппроксимация была выполнена методом наименьших квадратов с использованием библиотеки *scipy* языка Python.

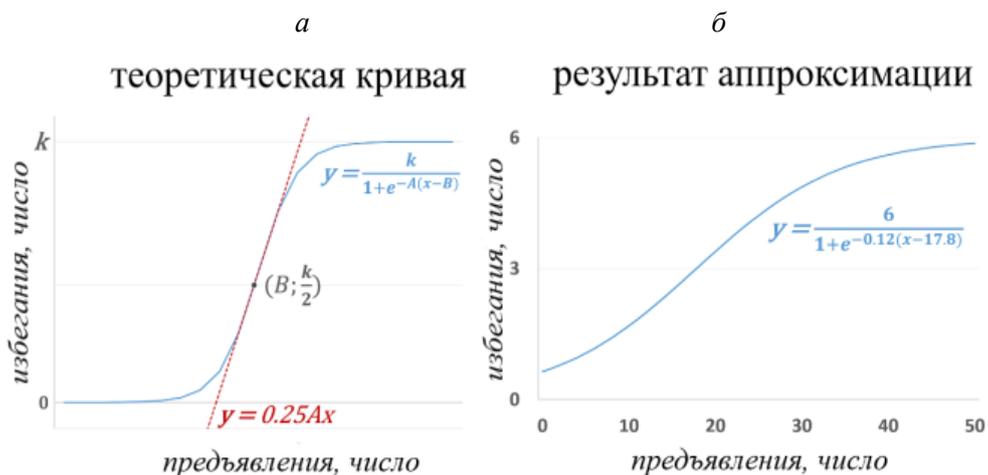


Рис. 2. Теоретический, условный график сигмоиды (а) и фактическая аппроксимация (б)

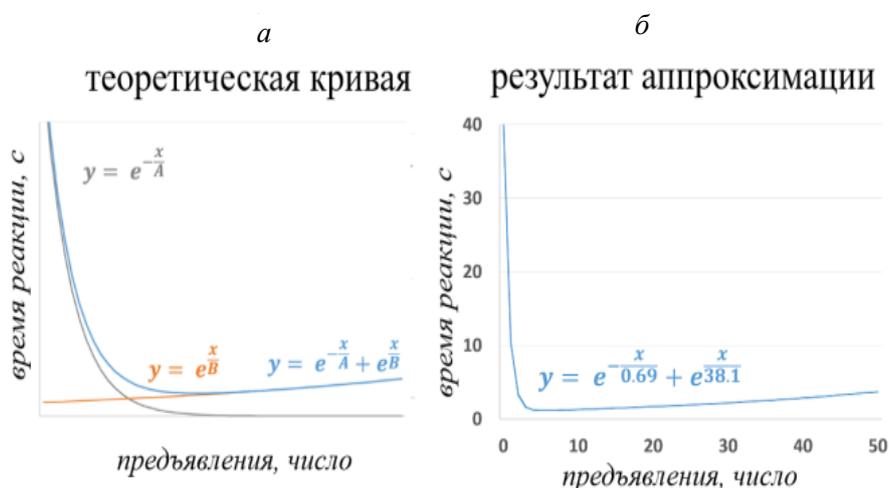


Рис. 3. Теоретический, условный график суммы экспонент (а) и фактическая аппроксимация (б)

Результаты аппроксимации

Подход 1: Сигмоида (рис. 2, б)

Этот метод позволяет более точно описать динамику обучения, особенно на ранних этапах, когда крысы переходят от случайного поведения к целенаправленному. Основные параметры и их значения:

$$A = 0,12 \ (0,08; 0,16).$$

Этот параметр мог характеризовать адаптивность или скорость обучения. Он представлял собой наклон сигмовидной кривой. В контексте задач с негативным подкреплением этот параметр отражал процесс избегания негативных стимулов. Значения этого параметра варьировались от 0,08 до 0,16, что указывало на относительно стабильную скорость обучения:

$$B = 17,8 \ (13,8; 25,7).$$

Этот параметр мог отражать точку адаптации или число попыток, необходимых для перехода от случайного выполнения теста к целенаправленному избеганию. Значения этого параметра варьировались от 13,8 до 25,7, это показывает, что крысам

требуется от 14 до 26 попыток для достижения стабильных результатов.

Подход 2: Сумма двух экспонент (рис. 3, б)

Аппроксимация двумя экспонентами: этот метод позволяет описать динамику поведения крыс как комбинацию двух экспоненциальных процессов. Медианные значения параметров A и B составили (Q25–75):

$$A = 0,69 \ (0,53; 3,53).$$

Этот параметр может отражать пассивность. Высокие значения указывают на пассивное поведение, где крысы медленнее выполняют задачу, особенно на ранних этапах. Значения варьировались от 0,53 до 3,53, что указывает на значительную изменчивость в уровне пассивности:

$$B = 38,1 \ (33,7; 43,6).$$

Этот параметр мог быть показателем выносливости или сопротивлением поведенческой усталости. Высокие значения указывали на более медленное снижение эффективности выполнения теста и более быстрое усвоение задачи, особенно на поздних этапах.

Значения варьировались от 33,7 до 43,6, что свидетельствует о стабильности и устойчивости в выполнении задания.

Обсуждение

Исследование динамики выполнения задач с негативным подкреплением у крыс с позиции психометрических функций может включать анализ параметров обучения: пассивности, выносливости, адаптивности и точки адаптации.

Пассивность в контексте исследования может отражать начальный этап обучения, когда крыса ещё не усвоила правила выполнения задачи и действует скорее инстинктивно или случайно. На этом этапе животное может демонстрировать нерегулярные и непредсказуемые реакции на стимулы.

Выносливость может быть связана со способностью крысы сохранять концентрацию и мотивацию на протяжении длительного времени выполнения задачи. Этот параметр может отражать устойчивость к усталости и способность сохранять активность в условиях негативного подкрепления.

Адаптивность характеризует способность крысы изменять свое поведение в ответ на изменяющиеся условия задачи. Например, крыса может адаптироваться к новым стимулам или изменениям в правилах выполнения задачи. Этот параметр подчеркивает гибкость и способность к обучению.

Точка адаптации может отражать момент, когда крыса достигает определенного уровня мастерства в выполнении задачи. Это может быть связано с переходом от случайного избегания негативных стимулов к целенаправленному и эффективному поведению.

Выводы

Выведенные в данной работе коэффициенты представляют собой потенциальные метрики для оценки индивидуальных особенностей обучения у крыс в рамках парадигмы УРДИ. Использование подхода с использованием нескольких метрик позволяет проводить анализ различных факторов, влияющих на эффективность выработки и демонстрации условного рефлекса, в т. ч. и не связанных непосредственно с обучением.

Литература

1. Diehl M.M., Bravo-Rivera C., Quirk G.J. The study of active avoidance: A platform for discussion // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2019. V. 107. P. 229–237.
2. Sangha S. et al. Know safety, no fear // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2020. V. 108. P. 218–230.
3. Sitnikova E., Smirnov K. Active avoidance learning in WAG/Rij rats with genetic predisposition to absence epilepsy // *Brain Res. Bull.* 2020. V. 165. P. 198–208.
4. Alexandrov P. et al. The Difference between Male and Female Rats in Terms of Freezing and Aversive Ultrasonic Vocalization in an Active Avoidance Test // *Physiologia.* 2023. V. 3, no. 3. P. 406–420.

Коррекция ошибок при многоклассовой классификации изображений на несбалансированных выборках

А.А. Лебедев, С.В. Стасенко

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
lebedev_rf_unn@mail.ru, stasenko@neuro.nnov.ru

Актуальность. Распознавание эмоций по изображениям лиц – важная задача для мониторинга состояния человека, систем безопасности и медицины. Одна из главных проблем – выраженный дисбаланс классов: в реальных данных преобладают изображения с эмоциями «счастье» и «нейтральное выражение», а такие классы как «страх», «отвращение» и «удивление» представлены значительно меньше [1, 2]. Это приводит к тому, что даже современные архитектуры нейронных сетей, включая сверточные сети (CNN), рекуррентные модели (RNN) и *attention*-механизмы, демонстрируют высокую среднюю точность, но при этом плохо обрабатывают малочисленные классы. Более того, в реальных условиях нередко возникают ситуации, когда модель сталкивается с классами, полностью отсутствовавшими в обучении [3, 4]. Целью данной работы является разработка метода, повышающего точность многоклассовой классификации в условиях дисбаланса распределения классов.

Методика исследования. В качестве основного датасета использован RAF-DB (Real-world Affective Faces Database) [2], содержащий 15 339 изображений, размеченных по 7 базовым эмоциям согласно следующему правилу: метка 1 кодирует удивление, 2 – страх, 3 – отвращение, 4 – счастье, 5 – грусть, 6 – злость, 7 – нейтральное состояние.

Методика включает следующие этапы:

- Итеративное исключение одного класса из обучающей выборки, обучение модели на оставшихся шести.
- Инференс на полном множестве классов, включая исключенный.
- Извлечение признаков: сохраняется ответ элементов нейронной сети на входные данные.
- Обучение корректора на извлеченных признаках.

Архитектура. Модель базовой сети реализована на PyTorch и состоит из трех сверточных блоков, рекуррентного LSTM и слоя Multihead Attention.

Коррекция ошибок классификации с помощью бустинга

Для повышения устойчивости к ошибкам базовой модели применяется градиентный бустинг (LightGBM [5]), обучаемый на латентных признаках.

Преимущества подхода:

- повышение точности на малых и исключенных классах,
- использование интерпретируемых признаков для анализа важности [6].

Результаты экспериментов. Эксперименты подтверждают, что включение корректора увеличивает точность классификации на всех классах, особенно на малочисленных. Например, при исключении класса «счастье» базовая модель не могла его распознать вовсе ($accuracy = 0$), тогда как после коррекции точность достигала 77 %; в то же время точность распознавания класса «страх» выросла до рекордных 99 %. Аналогичные улучшения наблюдались для всех остальных классов за исключением класса, лишённого эмоций, – нейтрального. Сводные результаты приведены в таблице.

Результаты тестирования двухуровневой системы

Коррект. класс \ Класс	1	2	3	4	5	6	7	Без коррекц.
1	.43	.77	.79	.84	.75	.76	.80	.78
2	.55	.24	.06	.43	.47	.45	.39	.43
3	.38	.50	.48	.98	.98	.97	.95	.74
4	.99	.99	.99	.77	.86	.90	.92	.90
5	.69	.71	.72	.71	.24	.72	.80	.78
6	.68	.66	.63	.63	.73	.20	.63	.67
7	.77	.76	.73	.79	.87	.71	.59	.90

Заключение

Предложенная методика совмещает устойчивость нейросетевых архитектур и гибкость ансамблевых моделей. Использование латентных признаков в качестве входов для корректирующей модели позволяет добиться существенного повышения точности в условиях несбалансированной выборки и отсутствия данных для некоторых классов. Метод доказал свою эффективность в задаче классификации эмоций на изображениях лиц, но также может быть полезен для задач антифрода, диагностики заболеваний и мониторинга поведения.

Литература

1. Buda M., Maki A. & Mazurowski M.A. A systematic study of the class imbalance problem in CNNs // *Neural Networks*. 2018. 106, 249–259.
2. Li S. & Deng W. Reliable Crowdsourcing and Deep Locality-Preserving Learning for Expression Recognition in the Wild // *CVPR*, 2019.
3. Bendale A. & Boulton T.E. Towards open set deep networks // *CVPR*, 2016.
4. Geng C. et al. Recent advances in open set recognition: A survey // *IEEE TPAMI*, 2020.
5. Ke G. et al. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree // *NeurIPS*, 2017.
6. Zhou Z.H. Ensemble Methods: Foundations and Algorithms // *Chapman & Hall/CRC*, 2012.

Применение нейроподобной функции невязки для обработки гидроакустических сигналов, принятых горизонтальной антенной решеткой

А.А. Лисин, А.И. Хилько

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород;
a.lisin@ipfran.ru

В настоящее время нейронные сети и нейроподобные алгоритмы активно исследуются и широко используются для решения различных практических задач. Одним из прикладных направлений, где применение таких методов демонстрирует высокую эффективность, является выделение акустических сигналов на фоне шумов в водной толще [1]. Обработка гидроакустических сигналов подводной локации и связи является сложной, многопараметрической задачей, имеющей большую степень неопределенности вследствие высокого уровня помех и их нестационарного характера. 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 [2, 3].

Целью данной работы является применение нейроподобной функции невязки для обработки

сигнала, смешанного с нестационарным шумом. В работе использовались записи реальных сигналов горизонтальной линейки гидрофонов, характеризующие гидроакустическую обстановку акватории мелкого моря. Рисунок 1 демонстрирует конкретные реализации сигналов одного из гидрофонов линейки, разнесенные во времени. Длительность отдельной реализации 70 с, частота дискретизации 250 Гц, отсюда величина отдельной реализации сигнальных векторов составляет 17496 отсчетов.

В силу того, что вероятность появления сигнала заранее неизвестна, используется критерий Неймана – Пирсона [4, 5], при котором для заданного значения вероятности ошибки первого рода (FAR) определяется допустимое значение вероятности ошибки второго рода (FRR). На его основании формируются рабочие характеристики (зависимости достоверности (1-FRR) при заданном значении

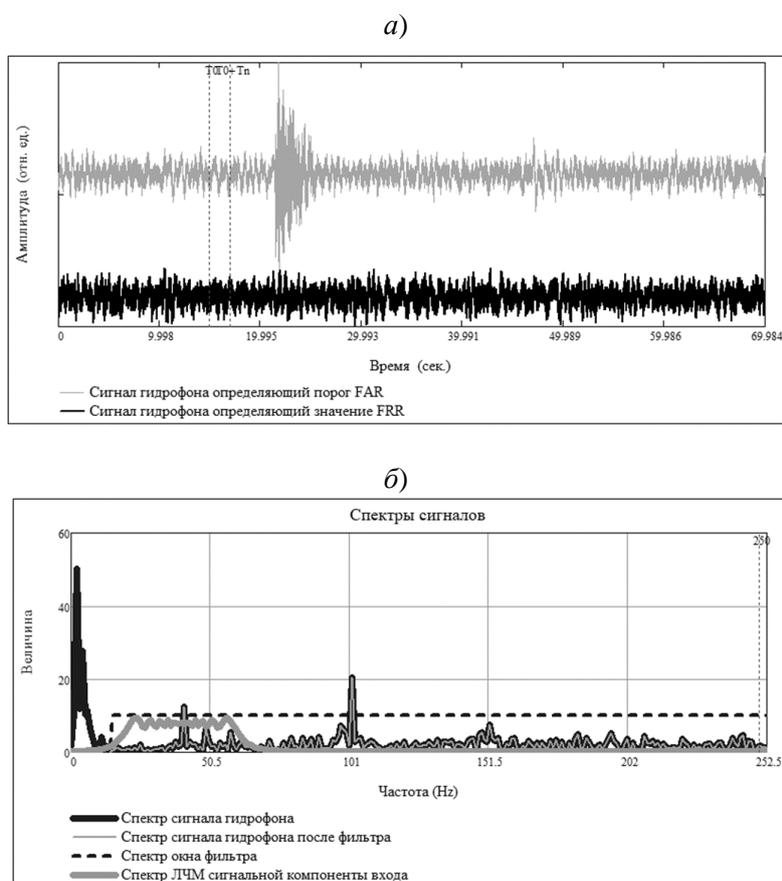


Рис. 1. Реализации сигналов гидрофона (а), используемые для формирования оценки плотности распределения невязок сигнала гидрофона и смеси сигнала гидрофона с ЛЧМ компонентой с тестовыми ЛЧМ сигналами; б – спектры, соответствующие сигналу, представленному на (а)



Рис. 2. Графики временной когерентности сигнала гидрофона. Пунктирной горизонтальной линией на рисунке определен порог величины корреляции, равный 0,4

ложной тревоги FAR от отношения сигнал/шум (SNR) на входе). В качестве тестового сигнала использовался вектор ЛЧМ сигнала длиной 512 отсчетов, амплитуда которого определялась как средняя амплитуда входного сигнала. Получение состоятельных оценок плотностей вероятностей распределения значений функции невязки происходит по сигнальным отрезкам временным окном 512 отсчетов, которые формируются из конкретных реализаций сигналов гидрофона путем сдвига окна по координате времени – так, чтобы когерентность сдвинутых по времени соседних сигнальных участков была ниже корреляционного порога.

Из рис. 2 видно, что характер временной когерентности сигнала гидрофона в основном определяется низкочастотной составляющей сигнала гидрофона. То есть, если частоты ЛЧМ компоненты входа находятся вне низкочастотной составляющей сигнала, то когерентность соседних последовательных сигнальных отрезков ниже порога 0,4, что определяет шаг сдвига временного окна в один отсчет. В этом случае одна реализация сигнала гидрофона позволяет сформировать достаточно состоятельную оценку плотности распределения значений функций невязки.

На рис. 3 представлены графики плотностей распределения функции корреляционной невязки и оценок достоверностей сигнальной локации по критерию Неймана – Пирсона при следующих параметрах: объем выборки оценки плотности распределения функций невязки ~ 17000, количество уровней гистограмм оценки плотностей распределений функций невязки 200, отношение сигнал/шум SNR на входе равно ≈ 12 дБ, пороговое значение ошибки ложного срабатывания (FAR) равно 0,1, оценка плотности распределения функций невязки, определяющая значение порога FAR, происходит по сигнальной реализации (рис. 1, а), оценка плотности распределения функций невязки в присутствии ЛЧМ сигнальной компоненты входа происходит по сигнальной реализации (рис. 1, б).

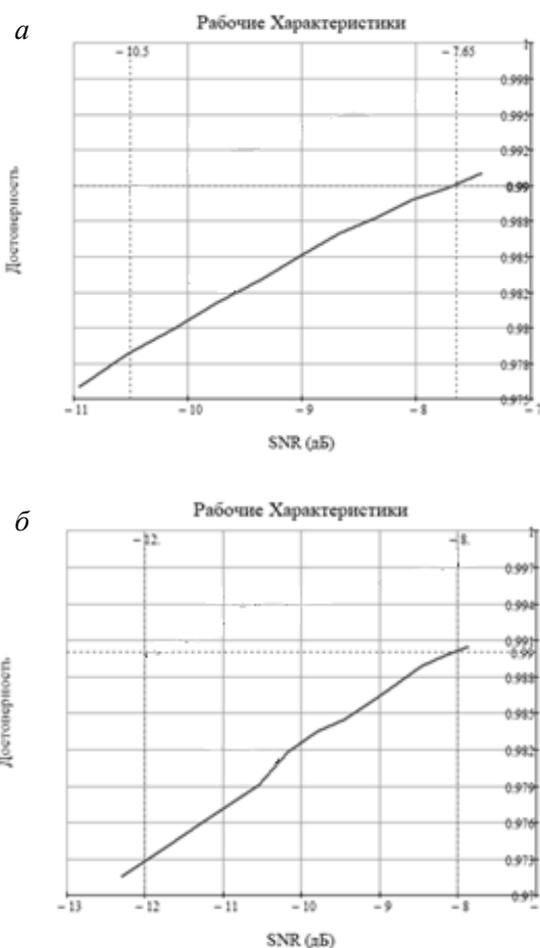


Рис. 3. Графики рабочих характеристик невязки: а – гидрофон № 17, б – гидрофон № 15

Отношение дисперсий сигнальных реализаций для гидрофона № 17 составило 1,485, для № 15 – 1,536.

Заключение

Результаты обработки гидроакустических сигналов, принятых горизонтальной антенной решеткой, позволяют сделать вывод, что при ста-

ционарном характере реального шума преимущества у невязок практически нет. Этот вывод является достаточно очевидным, и говорит о том, что при решении прикладных задач необходимо реализовывать несколько параллельных алгоритмов обработки различными невязками и классическим корреляционным анализом. При наличии тренда на нарастание нестационарности шумов в принятом сигнале эффективность нейроподобной невязки будет расти по сравнению как с функцией корреляции, так и с ковариационными невязками.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН по теме № FFUF-2024-0035.

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. Хоботов А.Г., Хилько А.И., Яхно В.Г., Романова В.И. Обработка сложных сигналов нейроподобными структурами // Нелинейная динамика в когнитивных системах: труды Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2011. С. 214–218.

5. 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.

Сетевая консолидация памяти, опосредованная структурной пластичностью

С.А. Лобов^{1,2,3}, А.И. Жаринов^{1,2}, Д.П. Курганов², В.Б. Казанцев^{1,2}

¹Московский физико-технический институт

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород;
losa99@yandex.ru

Консолидация памяти в мозге представляет собой сложный процесс, включающий синаптический уровень (стабилизацию связей через пластичность) и системный уровень (перераспределение информации между областями мозга, например, из гиппокампа в кору) [1]. Ключевой проблемой нейробиологии является дилемма «пластичность-стабильность»: синаптическая пластичность необходима для кодирования новой информации, но потенциально разрушительна для уже сохраненных воспоминаний. При этом забывание можно рассматривать в качестве фундаментального свойства нейронных систем, а не просто сбоя [2].

Текущая работа фокусируется на роли структурной пластичности, в частности адаптивной перестройки синаптических связей (англ. rewiring), управляемой пластичностью, зависимой от времени спайков (STDP), в решении дилеммы «пластичность-стабильность» в контексте надежности хранения информации и забывания в спайковых нейронных сетях (СНС). Подробное описание модели и полученных результатов можно найти в работе [3].

Исследование основано на вычислительной модели СНС, состоящей из 500 нейронов (соотношение возбуждающих/тормозных 4:1), пространственно распределенных в двумерном слое со случайными координатами. Динамика отдельных нейронов моделировалась с использованием уравнений Ижикевича [4], а динамика синапсов – моделью Цодыкса – Марккрама [5], учитывающей эффекты кратковременной пластичности (депрессию и фасилитацию). Начальная структура связей задавалась случайным образом с вероятностью соединения, убывающей по Гауссову закону с увеличением расстояния между нейронами. Долговременная синаптическая пластичность реализовывалась через механизм STDP с мультипликативным правилом изменения весов [6].

Ключевой элемент исследования – модель структурной пластичности по алгоритму, предложенному в работе [7]: каждую секунду моделирования все синаптические связи с весом, находящимся ниже порогового значения в течение заданного времени, удалялись; вместо каждого удаленного соединения создавалась новая связь с начальным весом, где постсинаптический нейрон выбирался случайно, а пресинаптический – с вероятностью, зависящей от расстояния. Моделирование включало в себя два варианта структурных перестроек: с возможностью устанавливать только одну связь между парой нейронов и с возможно-

стью образования множественных связей. Для индукции и оценки глобальной сетевой памяти использовался следующий протокол [2, 8].

1) Сеть стимулировалась в определенной пространственной локации до возникновения устойчивой синхронизации ответа (формирование следа памяти в весах связей).

2) После отключения стимула в течение периода спонтанной активности, вызванной гауссовым шумом, отслеживался процесс забывания.

3) Мерой памяти служил косинус угла (M) между глобальным вектором коннектома сразу после стимуляции и текущим вектором; забывание фиксировалось при $M \leq -0,7$.

4) Надежность памяти (R) определялась как десятичный логарифм числа популяционных пачек активности (N_b), произошедших до момента забывания. Для анализа крупномасштабных изменений в сети применялась визуализация с помощью векторных полей, отображающих как синаптический (весовой) коннектом, так и анатомический (топологический) коннектом [7, 8]. Также детектировались хабы – нейроны, способные инициировать глобальные популяционные пачки спайков при единичной стимуляции [2].

Основной результат исследования демонстрирует, что включение структурной пластичности в фазу спонтанной активности после стимуляции приводит к драматическому увеличению надежности памяти (R) по сравнению с сетями, где действует только синаптическая пластичность STDP. При умеренном уровне шума сеть с включенной структурной пластичностью сохраняет память ($R > 5$, что означает отсутствие забывания в пределах длительности эксперимента), в то время как сеть без структурной пластичности демонстрирует существенно более низкую надежность ($R \approx 2,5$). Учитывая логарифмическую шкалу R , это означает, что при данном уровне шума память сохраняется в сети с перестройкой связей более чем в 300 раз дольше. Экстраполяция для низкого шума показывает еще более впечатляющий эффект: время до забывания увеличивается примерно со 100 секунд (1000 сетевых пачек, $R = 3$) до полугода моделируемого времени ($1,7 \times 10^8$ пачек, $R \approx 8,23$). Этот мощный стабилизирующий эффект наблюдается как для варианта с единичными связями, так и для варианта с множественными.

Анализ механизма выявил феномен самоорганизующейся консолидации: под действием STDP во время стимуляции формируется специфический паттерн синаптических весов («синаптический

след»), визуализируемый векторным полем весов. В последующий период спонтанной активности структурная пластичность изменяет анатомическую структуру сети (топологический коннектом, визуализируемый векторным полем связей), причем векторное поле связей после длительной спонтанной активности структурно «копирует» векторное поле весов, сформированное сразу после стимуляции, тем самым стабилизируя след памяти.

Важную роль в поддержании стабильности играют нейроны-хабы: сети с сохраненной памятью характеризуются значительным количеством хабов, и их число остается стабильным или даже возрастает при наличии структурной пластичности, тогда как без нее забывание сопровождается резким снижением числа хабов.

Хотя структурная пластичность может вызывать сдвиг в соотношении возбуждающих связей к возбуждающим (ЕЕ) и тормозным (ЕI), численные эксперименты со структурной пластичностью, охватывающей только ЕЕ-связи, показали, что этот сдвиг в балансе возбуждения/торможения не является основным фактором, ответственным за стабилизацию памяти, так как эффект усиления надежности R сохраняется в полной мере.

Представленная работа убедительно показывает, что структурная пластичность, управляемая STDP и происходящая в условиях спонтанной активности сети, является ключевым механизмом консолидации памяти в спайковых нейронных сетях. Этот механизм обеспечивает высокую устойчивость следов памяти к дестабилизирующему влиянию шума, увеличивая длительность хранения информации на порядки по сравнению с сетями, где действует исключительно синаптическая пластичность. Суть процесса заключается в самоорганизующейся консолидации: паттерн синаптических изменений, инициированный STDP в ответ на стимул, постепенно «отпечатывается» в анатомической структуре сети через структурную перестройку во время спонтанной активности. Функциональную стабильность сети и способность воспроизводить сохраненный паттерн поддерживает формирование и сохранение хабов, способных инициировать координированные популяционные пачки спайковой активности. Таким образом, структурная перестройка связей, традиционно ассоциируемая с забыванием (например, при

нейрогенезе), в данном контексте выступает мощным фактором стабилизации памяти, предлагая элегантное решение дилеммы «пластичность-стабильность». Эти результаты имеют важное значение для понимания фундаментальных принципов работы памяти в биологических нейронных сетях и могут быть использованы при разработке более устойчивых к шуму нейроморфных вычислительных систем и алгоритмов искусственного интеллекта. Ограничениями исследования являются использование упрощенных моделей нейронов и синапсов, игнорирование элементов гомеостатической пластичности, влияния астроглии и нейромодуляции. Перспективные направления включают интеграцию мультимодальных форм пластичности, исследование консолидации в многослойных архитектурах, экспериментальную верификацию роли хабов и структурной пластичности в биологических сетях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-11-00134) и Министерства науки и высшего образования (проекты FSMG-2024-0047, FFUF-2024-0037).

Литература

1. Guskjolen A., Cembrowski M.S. Engram neurons: Encoding, consolidation, retrieval, and forgetting of memory // *Mol. Psychiatry*. 2023. V. 28, no. 8. P. 3207–3219.
2. Лобов С.А. Обобщенная память спайковой нейронной сети с STDP пластичностью // *Мат. биол. и биоинф.* 2019. Т. 14, № 2. С. 649–664.
3. Lobov S.A. et al. Network memory consolidation under adaptive rewiring // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2025.
4. Izhikevich E.M. Which model to use for cortical spiking neurons? // *IEEE Trans. Neural Networks*. 2004. V. 15, no. 5. P. 1063–1070.
5. Tsodyks M., Pawelzik K., Markram H. Neural networks with dynamic synapses // *Neural Comput.* MIT Press, 1998. V. 10, no. 4. P. 821–835.
6. Morrison A., Diesmann M., Gerstner W. Phenomenological models of synaptic plasticity based on spike timing // *Biol. Cybern.* Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. V. 98, no. 6. P. 459–478.
7. Lobov S.A. et al. STDP-Driven Rewiring in Spiking Neural Networks under Stimulus-Induced and Spontaneous Activity // *Biomimetics*. 2023. V. 8, no. 3.
8. Lobov S.A. et al. Spatial Memory in a Spiking Neural Network with Robot Embodiment // *Sensors*. 2021. V. 21, no. 8.

Разработка двухпорогового алгоритма распознавания ориентиров в биоморфной системе визуальной навигации

Ю.А. Малышев¹, С.А. Лобов^{1,2}, В.Г. Яхно^{1,2}

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
smmalisheva@gmail.com

Ориентирование в пространстве и навигация являются важными навыками, необходимыми для выживания людей и животных. Для изучения механизмов работы навигации в нейронных системах и проверки гипотез об их функционировании представляется разумным создание их вычислительных моделей [1]. В предшествовавшей работе была выполнена доработка подобной системы, применение более современного модуля визуальной одометрии и оптимизация значений настраиваемых параметров [2]. Данная работа посвящена дальнейшей оптимизации системы, связанной с уменьшением затрат памяти и вычислительных ресурсов для функционирования системы.

Цель настоящей работы состоит в создании и изучении динамики функционирования модифицированного варианта биорелевантной системы визуальной навигации. В работе исследуется система визуальной навигации, являющаяся подвидом систем одновременного определения местоположения и построения карты (Simultaneous Localization And Mapping – SLAM). Целью функционирования данных систем является определение текущего местоположения субъекта в пространстве относительно окружающих объектов и относительно своих предыдущих местоположений, а также составление карты окружающего пространства. Подобные алгоритмы принимают на вход данные, получаемые от различных сенсоров, установленных на подвижном субъекте (моно- либо стереоизображение от видеокамеры, облако точек от лидара, скорость либо ускорение от соответствующих датчиков), а на выходе выдают информацию о текущем местоположении субъекта на карте окружающего пространства. Это достигается при совместной работе процессов, выполняющихся и в биологических, и в технических системах: интеграция пути (суммирование всех перемещений субъекта относительно собственных предыдущих положений) и замыкание циклов (восстановление «запомненного» местоположения при попадании субъекта в уже известные точки пространства; при этом происходит сброс ошибки интеграции пути). В данной работе основное внимание уделяется модулю распознавания визуальных ориентиров, определяющего ранее посещенные области пространства и предоставляющего информацию о замыкании циклов.

Движение субъекта 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 работе рассматривается подобная система, работающая со входными данными в виде последовательности монокулярных изображений: RatSLAM [1, 3] и Orb-SLAM2 [4, 5], выполняющие вышеуказанные операции путем использования 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.

Данная система принимает на вход информацию от внешнего блока одометрии на основе системы визуальной навигации Orb-SLAM2 [4, 5]. Данная конфигурация системы была ранее предложена в работе [2].

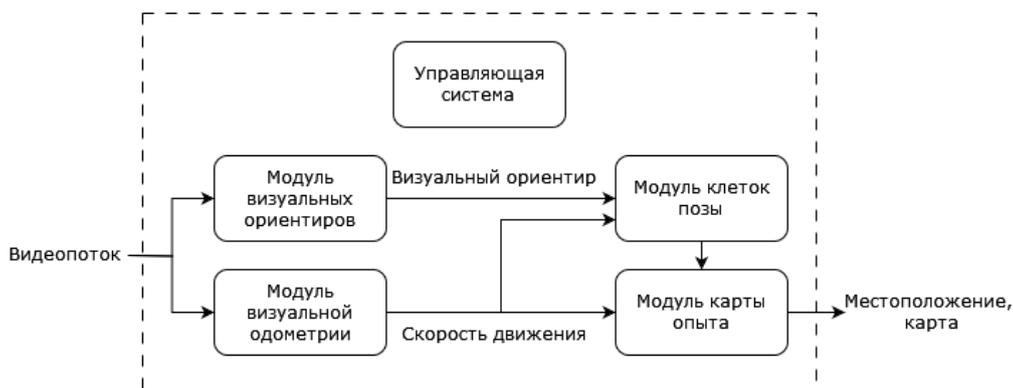


Рис. 1. Структура системы RatSLAM

Модуль визуальных ориентиров содержит расширяемую коллекцию изображений – шаблонов визуальных ориентиров. Новый визуальный ориентир формируется, если входное изображение существенно отличается по значению метрики от всех известных ориентиров. Таким образом, можно считать, что данный модуль выполняет задачу кластеризации входных изображений в пространстве интенсивностей всех пикселей изображения. Распознавание входного изображения как одного из визуальных ориентиров аналогично попаданию точки в пространстве интенсивности пикселей, соответствующей данному изображению, в соответствующий кластер визуального ориентира.

Оригинальная система принимает решение о создании нового и о распознавании известного ориентира на основании превышения одного и того же порога значения метрики несоответствия. То есть при предъявлении нового изображения система либо распознает его как один из известных ориентиров, либо определит как новый ориентир. Такой подход имеет недостаток в том, что при входном изображении на границе кластеров соседних ориентиров возможно постоянное переосаживание между двумя ориентирами. Это приводит к ложному определению ориентиров и, соответственно, местоположения.

С точки зрения кластеризации, равные пороги распознавания соответствуют случаю, когда размер (радиус) кластера равен расстоянию между центрами кластеров. При этом имеет место существенное наложение кластеров.

Поэтому было предложено разделить процессы создания и распознавания ориентиров. Создание ориентиров выполняется по более высокому значению порога метрики несоответствия, что дает лучше разделяющиеся кластеры (более различающиеся ориентир). Распознавание происходит с меньшим значением порога, то есть только изображения, действительно похожие на ориентир, распознаются как этот ориентир. Это создает зоны на границах кластеров, в которых не происходит распознавания каких-либо ориентиров. Таким образом, при получении нового изображения система может либо распознать его как имеющийся ориентир, либо сохранить его как новый ориентир, либо не предпринимать никаких действий.

Это позволило существенно повысить пороги создания новых ориентиров и, соответственно, уменьшить их количество в несколько раз без существенных потерь в точности карты, что приводит к уменьшению требуемых для работы системы памяти и вычислительных ресурсов.

При этом введение различия между размером (радиусом) кластера, соответствующего порогу распознавания визуальных ориентиров, и расстоянием между кластерами, соответствующим порогу создания новых визуальных ориентиров в случае, если порог распознавания ниже порога создания, должно обеспечить более равномерную кластеризацию.

На рис. 2, б приведено распределение средней абсолютной ошибки локализации (нормирована на максимальную ошибку, показана цветом) на траектории Kitti 00 [6] при различных величинах порогов создания (ось ординат) и распознавания (ось абсцисс) ориентиров. На главной диагонали представлен случай оригинальной системы, в которой пороги равны. Можно видеть, что на больших значениях порогов происходит резкий рост ошибки, связанный с ошибочным распознаванием ориентиров. При этом при уходе с главной диагонали в сторону меньших абсцисс (порог распознавания меньше порога создания) восстанавливаются небольшие значения ошибок.

На рис. 2, а представлен срез распределения средней абсолютной ошибки локализации по главной диагонали (синий график, соответствует оригинальной системе), а также отступая на 4 значения влево от главной диагонали (оранжевый график). По оси ординат также величина средней абсолютной ошибки локализации, но по оси абсцисс приведено количество ориентиров, созданных на траектории. Можно видеть, что рост ошибки на траектории Kitti 00 для оригинальной системы начинается при количестве ориентиров менее порядка 2000, для системы с двумя порогами нарастание ошибки начинается при количестве ориентиров менее порядка 300.

С помощью построенной системы были получены оценки местоположения на открытых (KITTI) [6] наборах данных. Далее приведены визуализации траекторий, полученных в результате тестирования.

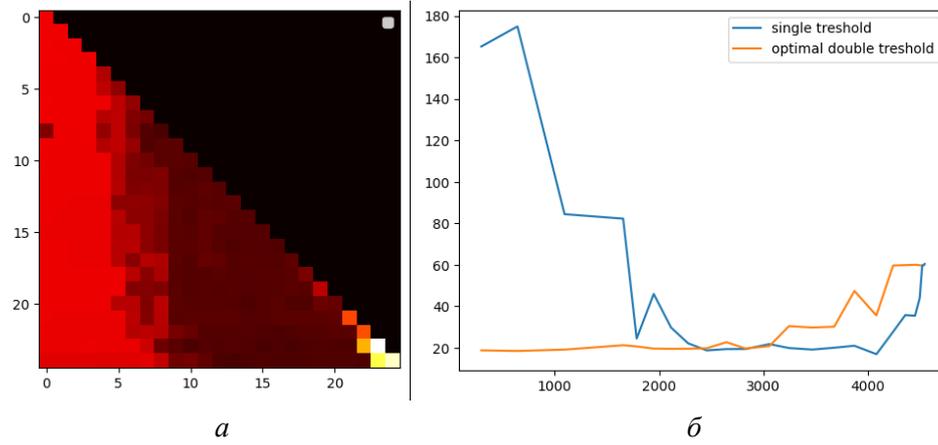


Рис. 2. Распределение средней абсолютной ошибки локализации на траектории Kitti 00 (a – при различных величинах порогов создания (ось ординат) и распознавания (ось абсцисс) ориентиров, b – зависимость от количества сохраненных визуальных ориентиров)

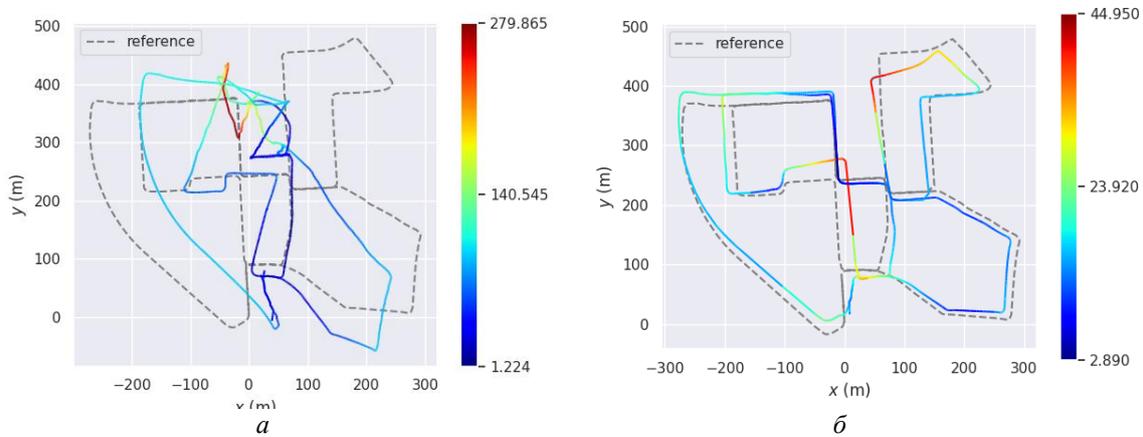


Рис. 3. Распределение абсолютной ошибки определения местоположения на траектории Kitti 00 (a – для оригинальной системы с одним порогом 0,1); b – для двухпороговой системы (порог создания 0,15, порог распознавания 0,08). Цветной линией обозначена оценка траектории, выполненная соответствующей системой. Пунктирной линией обозначена истинная траектория

На рис. 3, a приведена визуализация оценки траектории системы с одним порогом при высоком значении порога. При этом происходят ошибочные замыкания циклов, приводящие к увеличению ошибки траектории. На рис. 3, b представлена траектория для двухпороговой системы с еще

большим значением порога создания. Однако траектория остается близкой к истинной.

Кроме того, были рассчитаны метрики кластеризации локальных видов. На рис. 4 представлено распределение кластеров по значениям индексов Данна [7] для одно- и двухпороговой системы.

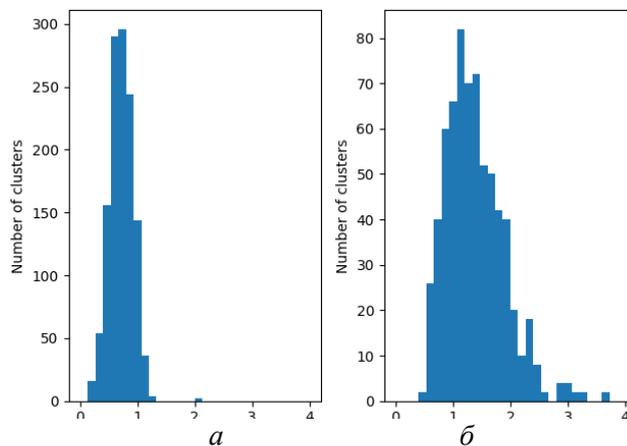


Рис. 4. Распределение кластеров в оригинальной (a) и двухпороговой (b) системе по значению индекса Данна

Более высокие значения индекса Данна соответствуют лучшей кластеризации. Из рисунка видно, что для оригинальной системы основная часть кластеров имеет значение индекса менее 1, тогда как для двухпороговой системы основная часть кластеров имеет индекс Данна более 1. Таким образом, применение двухпорогового алгоритма позволит существенно оптимизировать затраты памяти и вычислительных ресурсов при выполнении алгоритма визуальной навигации при незначительном снижении точности карты. Также применение алгоритма позволяет улучшить устойчивость работы системы на наборах данных с визуально схожими изображениями.

Литература

1. *Milford M. et al.* RatSLAM: A hippocampal model for simultaneous localization and mapping // IEEE Int. Conf. Rob. Autom. 1. 403–408. V. 1. 10.1109/ROBOT.2004.1307183.
2. *Мальшиев Ю.А., Яхно В.Г.* Версия биоморфной системы навигации // Изв. вузов. ПНД. 2024. Т. 32, вып. 5. С. 606–624. DOI: 10.18500/0869-6632-003107, EDN: BUSCAO.
3. *Ball D. et al.* OpenRatSLAM: an open source brain-based SLAM system // Autonomous Robots. 2013. 34. 1–28. 10.1007/s10514-012-9317-9.
4. *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.
5. *Mur-Artal R., Tardós J.D.* ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras // IEEE Transactions on Robotics. 2017. V. 33, no. 5. P. 1255–1262. Doi:10.1109/TRO.2017.2705103.
6. *Geigere A. et al.* Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2012. Providence, RI, USA. 2012. P. 3354–3361. Doi: 10.1109/CVPR.2012.6248074.
7. *Dunn J.* A fuzzy relative of the ISODATA Process and Its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters // Cybernetics and Systems. 1973. 3. 32–57. 10.1080/01969727308546046.

Математическое моделирование языковой ассимиляции мигрантов: эффект четырех поколений

А.В. Медведев, О.А. Кузенков

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
a.medvedev.unn@gmail.com

Проблема языковой ассимиляции мигрантов является одной из актуальных задач современной социолингвистики и демографии. Существующие модели языковой динамики, восходящие к классической работе Абрамса и Строгатти [1–9], как правило, рассматривают упрощенные сценарии перехода между монолингвальными состояниями через промежуточное двуязычие. В настоящей работе предлагается новый подход к моделированию языковой ассимиляции, основанный на принципах, используемых в моделировании распространения инфекций [10], и учитывающий реальную сложность миграционных процессов. Ключевой особенностью модели является выделение четырех различных языковых состояний, отражающих поэтапный характер ассимиляции и роль языковой идентичности.

Цель настоящего исследования – построение и исследование новой математической модели языковой ассимиляции мигрантов, учитывающей эффект четырех поколений [11]: монолингвы родного языка, билингвы с родной идентичностью, билингвы с принимающей идентичностью и полностью ассимилированные монолингвы языка принимающей стороны. Строится новая модель на гипотезе эффективных встреч [12] с учетом межпоколенческих переходов, эффекта диаспоры и обратимости ассимиляционных процессов. Модель исследуется классическими методами качественной теории динамических систем. Проводится анализ стационарных состояний и условий устойчивого сосуществования языковых групп. Установлен эффект поэтапной языковой ассимиляции через последовательные состояния билингвизма с различной языковой идентичностью. Определены параметрические условия, при которых возможны различные устойчивые режимы: полная ассимиляция, устойчивое многообразие языковых групп и этническое возрождение. Показана ключевая роль диаспорных сообществ как проводников языковой адаптации для новых мигрантов. Модель четырех поколений позволяет описать сложную динамику языковой ассимиляции, включая возможность обратных процессов и роль промежуточных билингвальных состояний в сохранении языкового разнообразия.

Рассматриваемая модель имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{z}_0 = -c_1 z_0 (z_2 + z_3) + \mu_0, \\ \dot{z}_1 = -r z_1 + c_1 z_0 (z_2 + z_3), \\ \dot{z}_2 = r z_1 - r z_2 + c_2 z_3 (z_0 + z_1), \\ \dot{z}_3 = r z_2 - c_2 z_3 (z_0 + z_1) - \mu_1, \\ z_1 + z_2 + z_3 + z_4 = 1, \quad z_{12} = z_1 + z_2. \end{cases} \quad (1)$$

Модель представляет собой систему дифференциальных уравнений четвертого порядка, описывающую динамику языковой эпидемии или языкового сдвига. Численность сообщества постоянна во времени (число рождений равно числу смертей). Величина z_0 – доля членов сообщества, которые являются мигрантами первого поколения (монолингвы родного языка), величина z_1 – доля членов сообщества, которые являются билингвами с идентификацией родного языка как главного, z_2 – доля членов сообщества, которые являются билингвами с идентификацией языка принимающей стороны как главного, z_3 – доля членов сообщества, которые являются полностью ассимилированными монолингвами языка принимающей стороны. μ_0 и μ_1 – потоки миграции; c_1 – престижность языка принимающей стороны (коэффициент языкового обучения новых мигрантов), c_2 – престижность языка мигрантов (коэффициент «возврата к корням»), r – параметр сдвига языковой идентичности. Первое уравнение отражает процесс, в котором мигранты первого поколения начинают изучать язык принимающей стороны. Скорость освоения второго языка пропорциональна контакту с уже частично или полностью ассимилированными мигрантами ($z_2 + z_3$). С билингвами, считающими родной язык главным (z_1), они общаются лишь на родном языке. Поэтому переход провоцируют лишь встречи с группами z_2 и z_3 . Это отражает важную роль диаспоры как проводника языкового обучения – новые мигранты учатся не столько от местного населения, сколько от более адаптированных соотечественников. Второе уравнение отражает процесс, в котором происходит формирование и трансформация группы билингвов с родной идентичностью: мигранты первого поколения становятся билингвами, но сохраняют идентификацию с родным языком, при этом постепенно происходит сдвиг языковой идентичности в сторону языка принимающей стороны (коэффициент r). Третье уравнение отражает процесс сдвига языковой идентичности билингвов, а также отказ билингвов от родного языка в пользу языка принимающей стороны. Учитывается обратный процесс (возврат к корням) – полностью ассимилированные мигранты (z_3) могут вернуться к двуязычию при контакте с менее ассимилированными группами, возможно, через культурные программы или этническое возрождение. С группой z_2 они общаются лишь на языке принимающей стороны, поэтому переход «возврат к корням» не провоцируется. Четвертое уравнение отражает процессы полной языковой ассимиляции и ее об-

ратимость. Билингвы с местной идентичностью полностью утрачивают родной язык, в то время как полностью ассимилированные мигранты могут «возвращаться» к двуязычию под влиянием новых волн миграции или «этнического возрождения».

Считается, что приобретение языка соответствует гипотезам Абрамса – Стругатти [9]. Фазовым пространством для (1) является стандартный симплекс [13].

Модель была исследована классическими методами качественной теории динамических систем [14–17]. Результаты исследования показали три возможных варианта развития динамики, которым соответствуют следующие состояния равновесия: полная ассимиляция: $z_0^* = z_1^* = z_2^* = 0$, $z_3^* = 1$, устойчивое многообразие: сосуществование всех групп, доминирование старых мигрантов: $z_0^* = 0$, $z_1^* = 0$, z_2^* , z_3^* .

Результаты исследования: при $c_1/r > 2$ доминирует прогрессивная ассимиляция. При $c_1/r \approx 1$ возможно устойчивое сосуществование. При $c_2 > r/2$ наблюдаются процессы «этнического возрождения».

Модель учитывает возможность обратной ассимиляции «возврата к корням» через параметр c_2 . Полностью ассимилированные мигранты могут возвращаться к двуязычию под влиянием различных событий, изменяющих параметры системы. Примером таких событий могут быть: культурные программы, действия этнических организаций, изменения в политике мультикультурализма. Два мостиковых перехода между уравнениями № 3 и № 4 показывают, что в зависимости от отношения их значений (rz_2 и $c_2z_3(z_0 + z_1)$) возможна как полная ассимиляция с замещением родного языка мигрантов на язык принимающей стороны, так и двуязычие с сохранением культурного наследия. Модель позволяет оценить эффективность различных мер языковой политики: поддержка билингвального образования влияет на параметр r , культурные программы изменяют коэффициент c_2 , интеграционные курсы воздействуют на параметр c_1 . На основе модели возможно построение долгосрочных прогнозов языковой динамики мигрантских сообществ при различных сценариях миграционной и языковой политики.

Ключевые результаты работы

1. *Поэтапность ассимиляции.* Показано, что языковая ассимиляция является многостадийным процессом с качественно различными промежуточными состояниями.

2. *Роль диаспоры.* Установлена ключевая роль более ассимилированных представителей диаспоры в языковой адаптации новых мигрантов.

3. *Обратимость процессов.* Модель демонстрирует возможность этнического возрождения и «возврата к корням» при определенных условиях.

4. *Практическая значимость.* Результаты могут быть использованы для разработки эффективной языковой и миграционной политики.

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. No. 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. Sociolgy*. 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, no. 4. P. 267–284.
5. Diaz M., Switkes J. A mathematical model of language preservation // *Heliyon*, 2021. V. 7, no. 5.
6. Alexandrova N. The disappearance of languages, natural bilingualism and nonlinear dynamics // 8th International Conference on Cognitive Science. Svetlogorsk, Russia. 2018. P. 35–37.
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.* 2003. 40:4, 479–519.
9. Abrams D., Strogatz S. Modelling the Dynamics of Language Death // *Nature*. 2003. 424, 900.
10. Kermack, W.O. and A.G. McKendrick. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 1927. V. 115, no. 772. P. 700–21. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/94815>. Accessed 4 June 2025.
11. Alexandrova N.Sh. Polylinguality and Transcultural Practices. 2023. 20(3). 436–455.
12. An Extension of Two Species Lotka-Volterra Competition Model [doi.org/10.11145/bmc.2021.12.171].
13. Kuzenkov O., Ryabova E. Optimal control of a hyperbolic system on a simplex // *Journal of computer and systems sciences international*. 2003. V. 42, no. 2. P. 227.
14. Kuzenkov O. The investigation of the population dynamics controls problems based on the generalized Kolmogorov model // *Journal of computer and systems sciences international*. 2009. V. 48, no. 5. P. 839–846.
15. Kuzenkov O., Ryabova E. Optimal control for a system on a unit simplex in infinite time // *Automation and remote control*. 2005. V. 66, no. 10. P. 1594–1602.
16. Kuzenkov O., Ryabova E. Mathematical models of selection processes // *N. Novgorod : Nizhny Novgorod State University*, 2010. P. 80–125.
17. Kuzenkov O., Ryabova E. Variational Principle for Self-replicating System // *Math. Model. Nat. Phenom*. 2015. V. 10(2). P. 115–129.

Некоторые особенности когнитивных функций при употреблении психоактивных веществ

Е.В. Михайлова, С.Б. Парин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
zzztarasova@gmail.com

При хроническом употреблении психоактивных веществ возникают выраженные когнитивные нарушения. Патогенез дефицита когнитивных функций у таких людей исследован недостаточно. Характер и выраженность нарушений когнитивных функций у пациентов, которые принимают психоактивные вещества, зависит от вида препарата, дозировки, длительности зависимости и возраста пациентов, но особое внимание уделяется видам препарата [1].

Целью исследования стало изучение функционального состояния головного мозга и когнитивных функций у лиц, принимающих различные психоактивные вещества, в сравнении с людьми, не использующими психоактивных веществ, и выявление особенностей когнитивных функций при употреблении психоактивных веществ.

Для проведения исследования использовалась технологическая разработка кафедры психофизиологии ФСН ННГУ им. Н.И. Лобачевского – интернет-платформа «Когнитом». На базе платформы реализован интерфейс, который позволяет, помимо имеющихся сценариев, использовать в различных исследованиях, создавать оригинальные тесты. В качестве методов объективизации были подобраны и использованы специальные когнитивные тесты.

По результатам применения модуля по тесту простой сенсомоторной активности моторные и когнитивные показатели в группе испытуемых, употреблявших метадон и соль, достоверно превышали таковые в контрольной группе (рис. 1А). Таким образом, изменения, вызванные влиянием используемых наркотических веществ, замедляют процессы обработки информации при простой сенсомоторной активности, когда не напряжены механизмы селективного внимания и работает только базовое внимание (наличие или отсутствие объекта на экране), то есть не происходит выделения признаков.

В модуле на сложную сенсомоторную активность в качестве целевого стимула были использованы семантические признаки «съедобное» и «несъедобное» (рис. 1Б). 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 более сложная нейронная сеть, больше модулей мозга участвуют в принятии решения. Причем, если есть нарушения в работе нейронной сети, то чем больше

модулей включается в принятие решения, тем контрастнее будут различия, что проявляется в результатах исследования (рис. 1Б). Выявленные различия во времени сенсомоторной реакции определяются достоверностью различий в когнитивном и моторном компоненте, что свидетельствует о нарушении ассоциативного мышления, замедлении скорости принятия решения в сравнении с контрольной группой.

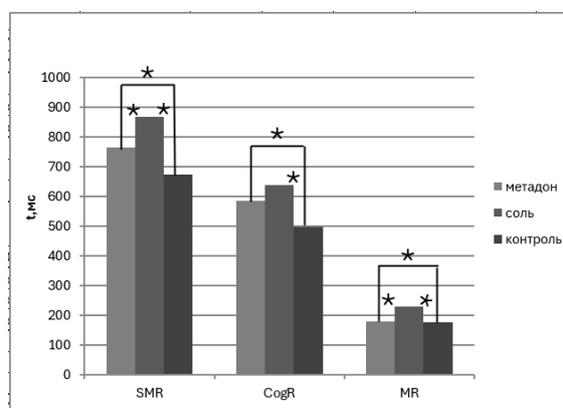


Рис. 1А. Особенности скорости процессов в простой сенсомоторной активности (* здесь и далее статистические достоверные различия ($p < 0,05$))

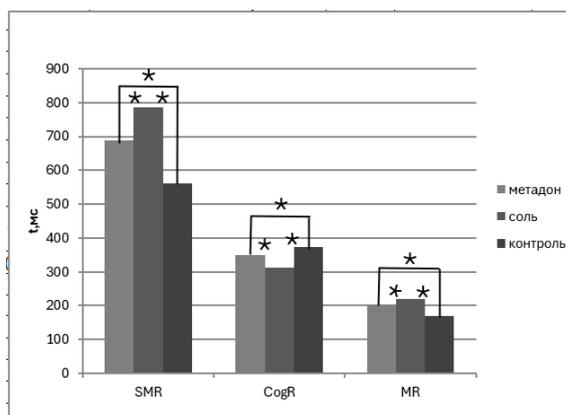


Рис. 1Б. Особенности скорости процессов в простой и сложной сенсомоторной активности

При этом у лиц с наркотической аддикцией значимо ($p < 0,05$) снижается точность выполнения тестов. Таким образом, результаты, представленные на рис. 2А, показывают, что по итогам статистического анализа с применением критерия Манна – Уитни выявлены достоверные различия по количеству ошибок между группами пациентов, употребляющих наркотические вещества, и контрольной группой, совершающих «ошибку пропуска» (ERR 1) в задании на простую сенсомоторную активность. Также в модуле на сложную

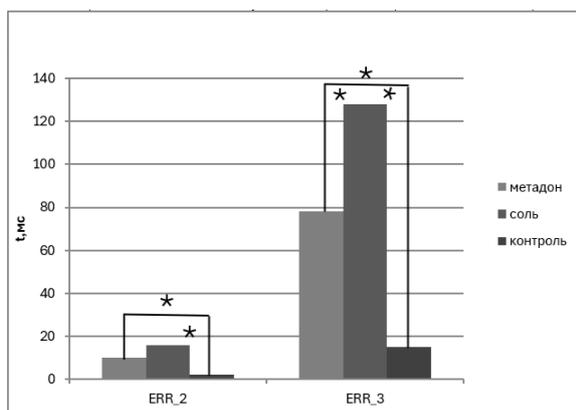


Рис. 2А. Особенности точности выполнения заданий в простой сенсомоторной активности

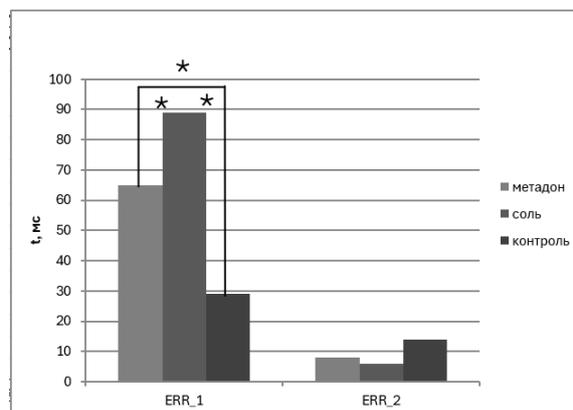


Рис. 2Б. Особенности точности выполнения заданий в сложной сенсомоторной активности

сенсомоторную активность (рис. 2Б) обнаружены статистически значимые различия ($p < 0,05$) между группами пациентов, употребляющих психоактивные вещества, и здоровыми, совершающими ошибку «ложная тревога» (ERR 3), что свидетельствует о том, что в контрольной группе испытуемые лучше дифференцируют целевой и нецелевой стимул, в отличие от лиц, употребляющих соли и метадон. При этом отсутствуют статистически значимые ($p > 0,05$) различия между группами пациентов, употребляющих метадон и соль, совершающих ошибку «двойное нажатие» (ERR 2), но зафиксированы значимые ($p < 0,05$) различия между этими группами и контрольной, что может свидетельствовать о дефиците возбуждательных и тормозных процессов и подтверждает гипотезу о развитии гипоксии и общем дефиците нейронной активности.

Проведенное исследование позволяет заключить, что интернет-платформа «Когнитом» является эффективным 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 при наркотической зависимости.

Литература

1. *Bruijnen C.J.W.H., Dijkstra B.A.G., Walvoort S.J.W., Markus W., Van Der Nagel J.E.L., Kessels R.P.C., De Jong C.A.J.* Prevalence of cognitive impairment in patients with substance use disorder // *Drug and Alcohol Review*. 2019. 38, 435–442.
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 // *Sovremennye tehnologii v medicine*. 2019. 11 (1), 109–115.
3. *Парин С.Б.* Стресс, боль и опиоиды. Об эндорфинах и не только. Минск : Дискурс, 2021. 208 с.

Связь сложности абстрактных изображений AFIS с оценкой их эмоциональной валентности

С.В. Морозова

Санкт-Петербургский государственный университет; svmpsy@gmail.com

Целью данного исследования была проверка валидности автоматической разметки базы абстрактных изображений AFIS в рамках вычислительного эксперимента. Предполагалось, что уровень объективной сложности фрактальных изображений будет связан с валентностью аффективной разметки базы AFIS.

«Система аффективных фрактальных изображений» (AFIS) содержит 165 цветных фрактальных изображений. База включает изображения множества Мандельброта, Жулия и Мандельбалба, а также губки Менгера. Кроме трехмерных фракталов она также включает их двумерные проекции. Они более абстрактны, чем типичные визуализации ковра Серпинского или множества Мандельброта, т. к. прорисованы с меньшим количеством деталей [10].

Стимульный материал генерировался с помощью *fracrive v. 0.4.8* (<https://fracrive.mimec.org>) для двумерных фракталов и *Mandelbulb3D v. 1.99.33* (<https://www.mandelbulb.com>) для трехмерных фракталов. Обе программы часто используются для визуализации математических фракталов. Всего было создано 200 цветных изображений разрешением 1024×768 px, 35 из которых позднее были исключены в связи с «пограничными» показателями эмоциональной валентности. Примеры фрактальных изображений можно увидеть на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Изображение трехмерного фрактала из базы AFIS

Для получения разметки базы сгенерированные изображения фракталов были классифицированы по уровню эмоциональной валентности, и определен уровень их абстрактности. Определение валентности осуществлялось с помощью предварительно обученной модели случайного леса [2]. Для проверки абстрактности стимульного материала мы воспользовались предобученными на корпусе ImageNet CNN VGG19 и ResNet50.

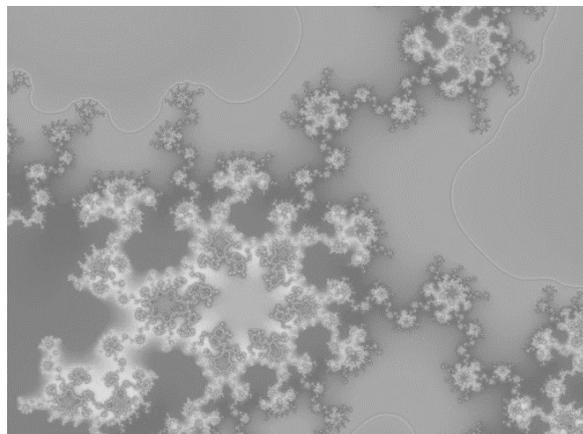


Рис. 2. Изображение двумерного фрактала из базы AFIS

В настоящее время достаточно хорошо изучен вопрос влияния фрактальных изображений на уровень стресса, а также на эмоциональные реакции испытуемых. Много свидетельств накоплено в пользу гипотезы о том, что люди предпочитают, чтобы изображения обладали средней фрактальной размерностью (в пределах 1,3–1,5) и сложностью [4, 13]. Слишком малое количество деталей или перегруженность мелкими, трудноразличимыми деталями снижает эмоциональную привлекательность изображения [6, 7]. Однако для произведений искусства фрактальная размерность может быть выше «золотой середины». Есть данные, что более красивыми и сложными испытуемые считают пейзажные картины по сравнению с абстрактными. Средняя фрактальная размерность пейзажей при этом составляла 1,81, а абстракций – 1,69 [5].

Кроме объективных мер сложности изображений, таких как фрактальная размерность, с нашей точки зрения также целесообразно учитывать оценку глубины изображения. Очевидно, что для стимулов AFIS глубина изображений может реконструироваться испытуемыми на основе монокулярных статических признаков, т. к. эти изображения являются плоскостными [1].

В исследовании Suh J. и др. изучалось влияние объемности цветных фрактальных изображений разной сложности на когнитивные / эмоциональные и поведенческие / мотивационные реакции испытуемых. Объемность изображений моделировалась благодаря монокулярным признакам глубины пространства. Исследователи использовали фракталы для оформления внутренних интерьеров моделей архитектурных зданий. Результаты показали, что максимальный интерес и желание исследовать пространство у испытуемых вызывали стимулы со средневысокой фрактальной размер-

ностью и большой глубиной. Кроме того, испытуемые считали более красивыми изображения со средним уровнем фрактальной размерности и глубиной [12].

В целом мы можем предположить, что трехмерные фракталы со средневысокой фрактальной размерностью и большой глубиной должны активировать испытуемых и вызывать интерес. Средне-низкий уровень фрактальной размерности и глубины таких стимулов вызывает, напротив, ослабление. Эстетические эмоции и ощущение комфорта с большой вероятностью будут выражены при просмотре двумерного стимульного материала со средней фрактальной размерностью. Однако мы должны помнить, что несколько популярных великих картин имеют фрактальную размерность в диапазоне от 1,71 до 1,89 [8, 14].

Сложность изображений AFIS оценивалась с помощью трех характеристик – двумерной и трехмерной фрактальной размерности, а также сложности Лемпеля – Зива. Такой подход позволил максимально полно оценить характеристики стимульного материала и при этом иметь возможность сопоставить полученные для базы AFIS параметры изображений с данными литературного обзора.

Для оценки фрактальной размерности изображений AFIS было принято решение о вычислении как двумерной, так и трехмерной фрактальной размерности, учитывающей яркость пикселей как третью меру. Вычисление двумерной фрактальной размерности визуальных стимулов начиналось с преобразования цветного изображения в черно-белое. Порог преобразования подбирался индивидуально для каждого стимула с помощью метода Оцу [3]. Площадь фрактала разбивалась на определенное количество равных ячеек для расчета фрактальной размерности (box covering algorithm), затем вычислялась фрактальная размерность Минковского – Булганда. Для решения задачи оценки трехмерной фрактальной размерности изображений, конвертированных в градации серого, мы использовали алгоритм, предложенный в [9].

С целью оценки глубины фрактальных изображений AFIS мы использовали монокулярный визуальный трансформер ViT MiDaS v.3 – Large, обученный на 1,4 миллионах изображений [11]. В итоге была получена матрица с информацией о близости каждого пикселя изображения. Общую глубину изображения мы оценивали как отношение пикселя с минимальной близостью к пикселю с максимальной близостью.

Для оценки вклада сложности и глубины в автоматическую оценку валентности изображений мы вычислили множественную регрессию. Зависимая переменная «валентность RF» была предварительно нормализована с помощью логарифмирования ($\log_{10}(\text{valence}) + 1$). Оценка мультиколлинеарности с помощью анализа факторов инфляции дисперсии показала ее отсутствие. Кроме параметров сложности и глубины в модель также была добавлена информация о яркости и контра-

стности изображений, т. к. они должны оказывать существенное влияние на эмоциональную оценку стимулов.

Итоговая модель включает четыре статистически значимых предиктора. $R^2 = 0,605$, $p < 0,01$. Основной вклад в дисперсию валентности вносят характеристики средней яркости изображений ($\beta = 0,880$) и сложность Лемпеля – Зива ($\beta = 0,372$). Кроме того, статистически значимыми оказались предикторы фрактальная размерность 2D ($\beta = 0,142$) и глубина изображения ($\beta = 0,147$).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в дисперсию автоматической оценки валентности, как и предполагалось, вносят вклад различные физические характеристики стимулов AFIS: сложность и глубина изображений, а также яркость цветовой палитры. При этом высокие показатели сложности характерны для изображений, имеющих более позитивные оценки автоматической разметки. Важно, что автоматическая разметка AFIS опирается в первую очередь на цветовую палитру изображений, а сами фрактальные изображения базы AFIS семантически нейтральны.

В дальнейшем планируется экспериментальная проверка влияния субъективных и объективных характеристик сложности стимульного материала AFIS на субъективную оценку эмоциональной валентности. В целом можно предположить, что в случае, когда стимулы AFIS эстетически привлекательны, испытуемые будут оценивать их более позитивно, особенно если эти изображения имеют большую глубину.

Литература

1. Гончаров О.А. Восприятие пространства и перспективные построения. СПб. : Изд-во СПбГУ, 2007. 252 с.
2. Морозова С.В. Модель предсказания аффективных характеристик цветовой палитры изображений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Психология, 2025. Т. 15, вып. 1. С. 103–115. <https://doi.org/10.21638/spbu16.2025.106>.
3. Bangare S.L. et al. Reviewing Otsu's method for image thresholding // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. V. 10(9). 21777–21783.
4. Chamberlain R. The interplay of objective and subjective factors in empirical aesthetics // Human Perception of Visual Information: Psychological and Computational Perspectives. Switzerland: Springer International Publishing, 2022. P. 115–132.
5. Forsythe A. et al. Predicting beauty: Fractal dimension and visual complexity in art // British Journal of Psychology. 2011. V. 102(1). P. 49–70. <https://doi.org/10.1348/000712610X498958>.
6. Kocaoğlu R., Olguntürk N. Color and visual complexity in abstract images // Color Res Appl. 2018. V. 43. P. 952–957. <https://doi.org/10.1002/col.22266>.
7. Kocaoğlu A.R., Olguntürk N. Color and visual complexity in abstract images: Part II // Color Res Appl. 2019. V. 44. P. 941–947. <https://doi.org/10.1002/col.22408>.
8. Lavdas A.A., Schirpke U. Aesthetic preference is related to organized complexity // PLoS ONE, 2020. V. 15(6). P. e0235257. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235257>.

9. Lee W.L., Hsieh K.S. A robust algorithm for the fractal dimension of images and its applications to the classification of natural images and ultrasonic liver images // *Signal Processing*. 2010. V. 90(6). P. 1894–1904.

10. Morozova S.V. An affective fractal image system (AFIS) // *Innovation, Identity, and Culture in the Digital Age: Interdisciplinary Approaches to Language, Law, and Society*. Sharjah : AST Consortium. 2025. P. 22–26.

11. Ranjil R. et al. Towards Robust Monocular Depth Estimation: Mixing Datasets for Zero-Shot Cross-Dataset Transfer // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2022. V. 44(3). P. 1623. DOI: 10.1109/TPAMI.2020.3019967.

12. Suh J. et al. Three-Dimensionalization Mediates the Subjective Experience of Fractal Interior Spaces // *Architecture*. 2024. V. 4(3). P. 651–667. <https://doi.org/10.3390/architecture4030034>.

13. Taylor R.P., Spratt J.C. Biophilic fractals and the visual journey of organic screen-savers // *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*. 2008. V. 12(1). P. 117–129.

14. Taylor R.P. et al. Perceptual and physiological responses to Jackson Pollock's fractals // *Frontiers in human neuroscience*. 2011. V. 5. P. 60. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00060>.

Сравнительный анализ процессов коннективности детей до и после игры с использованием гаджета

Е.И. Николаева, Н.В. Сутормина, И.А. Калабина

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург;
klemtina@yandex.ru

Созревание мозга может быть изучено через функциональную коннективность (связность), которая представляет собой интеграцию и сегрегацию нейронных сетей (Uchitel et al., 2022). С позиции теории графов, коннективность – статистическая взаимосвязь (корреляция) между узлами сети. Узлами могут быть воксели, различные области мозга или, как показано в нашем исследовании, электроды. Статистические взаимосвязи между узлами называют ребрами. Используя основные элементы сети, такие как узлы и ребра, можно рассчитывать различные метрики (глобальная эффективность, модульность и т. д.), которые будут характеризовать конкретную сеть. Это позволяет оценить параметры сегрегации и интеграции сетей (Shenoy Handiru et al., 2021).

В частности, топология сети малого мира характеризуется оптимальным балансом между сегрегацией и интеграцией сети. Архитектура сети малого мира характеризуется короткой длиной пути между узлами, которая обычно состоит всего из нескольких ребер, в то время как большинство узлов не связаны напрямую друг с другом (Yang et al., 2022). На глобальном уровне высоко интегрированная сеть с большим количеством связей требует значительных затрат на ее поддержание. Напротив, в сети с высокой кластеризацией (сегрегацией) передача информации происходит медленнее, поэтому архитектура малого мира считается оптимальной для передачи информации в мозговых сетях. Малый мир характеризуется модульностью, поскольку соседние узлы сгруппированы в кластеры, и относительно короткой длиной пути (немного ребер), поскольку кластеры соединяются через хабы. Другими словами, оптимальное сочетание функциональной интеграции и сегрегации отражает свойства сети малого мира (Akin et al., 2024).

Показано, что состояние мозговых сетей связано с когнитивными способностями (Uchitel et al., 2022). Например, более интегрированное состояние связано с более быстрым и точным выполнением когнитивных задач (Menon, D'Esposito, 2022). У детей переключение между различными конфигурациями сети происходит реже, и одна конфигурация сохраняется в течение более длительных периодов (Ryali et al., 2016). По мере созревания мозга межмодульные связи ослабевают, в то время как внутримодульные связи усиливаются, что приводит к увеличению модульности. Этот рост независимости модулей способствует большей специализации мозговых функций (Хуан, 2020). Относительно высокая модульность сети может быть индикатором пластичности мозга в результате обучения. Кроме того, модульные сети

лучше адаптируются к обучению новым навыкам (Gallen, D'Esposito, 2019).

Функциональная интеграция – это способность сети быстро соединять несколько различных областей (модулей) друг с другом. Функциональная интеграция часто определяется длиной пути; чем короче путь между узлами, тем выше функциональная интеграция. Глобальная эффективность может быть использована как индикатор функциональной интеграции, так как она представляет собой среднюю длину кратчайшего пути между всеми парами узлов (в данном исследовании – электродов) (Conti et al., 2022). Другая метрика сети, модулярность, отражает степень, в которой сеть может быть разделена на отдельные, относительно автономные группы или кластеры (Kang et al., 2024). Кроме того, ассортативность – это метрика, указывающая на вероятность того, что узлы с одинаковым количеством связей (ребер) будут связаны друг с другом (Ismail, Karwowski, 2020). Сеть считается дисассортативной, если узлы с большим количеством ребер стремятся соединяться с узлами с меньшим количеством ребер. Напротив, сеть является ассортативной, если узлы с большим количеством связей склонны связываться с другими высокосвязанными узлами. Ассортативные сети с большим количеством связей, как правило, более стабильны, тогда как дисассортативные сети, такие как биологические, обычно менее стабильны (Conti et al., 2022). Глобальная эффективность считается мерой функциональной интеграции сети. Такой параметр, как модулярность, считается мерой функциональной сегрегации сети. Ассортативность, в свою очередь, является индикатором стабильности сети (Massullo et al., 2022).

Целью данного исследования стала оценка состояния коннективности дошкольников до и после игры с использованием гаджета.

Материалы и методы

В исследовании приняли участие 37 детей, из них 14 девочек. Электроэнцефалограмма записывалась в состоянии покоя в течение трех минут до и после игры, в которую дети играли на смартфоне. Цель игры – бежать, собирать золото и избежать препятствий, то есть она позволяет оценить быстроту реакции, которая отражается в количестве допущенных ошибок. Так как выборка была небольшой, проводить иерархический кластерный анализ сразу по множеству переменных было невозможно. Поэтому сначала мы использовали анализ главных компонент (PCA) – он позволяет сократить число переменных, сохранив основные

характеристики данных. Перед этим мы провели тест Кайзера – Мейера – Олкина и тест Бартлетта, которые подтвердили, что данные подходят для такого анализа. Также была проведена стандартизация, чтобы привести все переменные к единой шкале. Были выделены две компоненты, которые объясняют 67,22 % дисперсии, и именно они использовались в дальнейшем иерархическом кластерном анализе. Такой подход – иерархическая кластеризация на основе главных компонент (НСРС) – удобен, когда неизвестно заранее, сколько будет кластеров. Метод *k*-средних в нашем случае не применялся, поскольку он требует большей выборки.

Результаты

Различия были обнаружены только для дельта-диапазона.

Дендрограмма показала, что выборку можно разделить на три кластера. Участники, входящие во второй кластер, допустили большее количество ошибок в игровой задаче. У них наблюдалась повышенная глобальная эффективность, а также сниженные модулярность и ассортативность в диапазоне дельта-ритмов (0,5–4,5 Гц). Такая комбинация может указывать на менее сегрегированную и менее устойчивую организацию нейронной сети, при которой связи между функционально значимыми узлами ослаблены, а передача информации в высокоинтегрированной сети может быть зашумленной. Эти результаты могут согласовываться с данными Stefanics и соавт. (2010), показавшими, что предсказуемые стимулы вызывают фазовую синхронизацию дельта-осцилляций, что, в свою очередь, способствует более быстрой и точной реакции. В условиях высокой ожидаемости события дельта-ритм мозга выравнивается по фазе с моментом стимула, тем самым повышая возбудимость нейронных популяций и улучшая межрегиональную координацию. В свете этих данных снижение модулярности и ассортативности, обнаруженное у участников с большим числом ошибок, может отражать неспособность сети поддерживать фазовое выравнивание и когнитивную синхронизацию, необходимую для эффективной подготовки к ожидаемому событию. Однако для подтверждения этих интерпретаций необходимы дальнейшие исследования с анализом фазовых характеристик дельта-ритма и их связи с функциональной структурой нейросетей.

Также увеличение дельта-ритма наблюдается в состоянии, характеризующемся антикорреляцией между таламусом и корой, что связано со снижением бодрствования или общего возбуждения (Varela, 2014). Таким образом, повышенное количество ошибок у дошкольников может быть связано со снижением общего уровня возбуждения. Также наблюдается снижение стабильности сети в диапазоне альфа-ритма у детей, относящихся ко второму кластеру, после игры по сравнению с другими

кластерами, что отражает сниженный показатель ассортативности (стабильности) сети, что также может быть связано со снижением общего уровня возбуждения.

Литература

1. Akin A., Yorgancıgil E., Öztürk O.C. et al. It is not a small world for psychiatric patients: Small-world of psychiatric patients // bioRxiv. 2024. <https://doi.org/10.1101/2024.03.25.586529>.
2. Conti M., Bovenzi R., Garasto E. et al. Brain Functional Connectivity in de novo Parkinson's Disease Patients Based on Clinical EEG // Front Neurol. 2022. V. 13. 844745. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.844745>.
3. Gallen C.L., D'Esposito M. Brain Modularity: A Biomarker of Intervention-related Plasticity // Trends in Cognitive Sciences. 2019. V. 23, no. 4. P. 293–304. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.01.014>.
4. Ismail L.E., Karwowski W. A Graph Theory-Based Modeling of Functional Brain Connectivity Based on EEG: A Systematic Review in the Context of Neuroergonomics // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 155103–155135. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3018995>.
5. Kang J.-H., Bae J.-H., Jeon Y.-J. Age-Related Characteristics of Resting-State Electroencephalographic Signals and the Corresponding Analytic Approaches: A Review // Bioengineering. 2024. V. 11. P. 418. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11050418>.
6. Massullo C., Imperatori C., De Vico Fallani F. et al. Decreased brain network global efficiency after attachment memories retrieval in individuals with unresolved/disorganized attachment-related state of mind // Sci Rep. 2022. V. 12. P. 4725. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08685-0>.
7. Menon V., D'Esposito M. The role of PFC networks in cognitive control and executive function // Neuropsychopharmacology. 2022. V. 47. P. 90–103. <https://doi.org/10.1038/s41386-021-01152-w>.
8. Ryali S., Supekar K., Chen T. et al. Temporal Dynamics and Developmental Maturation of Salience, Default and Central-Executive Network Interactions Revealed by Variational Bayes Hidden Markov Modeling // PLOS Computational Biology. 2016. V. 12, no. 12. P. e1005138. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005138>.
9. Shenoy H.V., Alivar A., Hoxha A. et al. Graph-theoretical analysis of EEG functional connectivity during balance perturbation in traumatic brain injury: A pilot study // Human Brain Mapping. 2021. V. 42, no. 14. P. 4427–4447. <https://doi.org/10.1002/hbm.25554>.
10. 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. P. 771–786. <https://doi.org/10.1038/s41390-021-01497-4>.
11. Varela C. Thalamic neuromodulation and its implications for executive networks // Front. Neural Circuits. 2014. V. 8. <https://doi.org/10.3389/fncir.2014.00069>.
12. Xuan B. From evaluation to prediction: Behavioral effects and biological markers of cognitive control intervention // Neural Plasticity. 2020. V. 2020. Article ID 1869459. <https://doi.org/10.1155/2020/1869459266>.
13. Yang S., Hwang H.S., Zhu B.H. et al. Evaluating the Alterations Induced by Virtual Reality in Cerebral Small-World Networks Using Graph Theory Analysis with Electroencephalography // Brain Sciences. 2022. V. 12, no. 12. P. 1630. <https://doi.org/10.3390/brainsci12121630>.

Гибридная методология построения имитационных моделей сильного искусственного интеллекта

А.В. Нечесов

Новосибирский государственный университет

В работе представлена гибридная методология построения интеллектуальных систем, объединяющая большие языковые модели (LLM), логико-вероятностные системы обучения и мульти-блокчейн. Основой подхода выступает задачный формализм, позволяющий интерпретировать запросы к LLM как формализованные задачи. Знания о задачах и их решениях хранятся в децентрализованной базе данных, распределённой по мульти-блокчейну и обрабатываемой смарт-контрактами. Интеграция международного ИИ-комитета (IAIC.World) обеспечивает этическое регулирование, а децентрализованные стейблкоины (enigma.ist) создают экономическую основу для стимулирования участников системы. Предложенный подход усиливает когнитивные способности искусственного интеллекта, устраняя галлюцинации LLM и обеспечивая непрерывное обучение через децентрализованную память.

1. Введение

Современные большие языковые модели (LLM), такие как GPT-4, демонстрируют впечатляющие способности к генерации текста и решению задач, но сталкиваются с фундаментальными ограничениями:

- Галлюцинации: создание недостоверных ответов.
- Черный ящик: непрозрачность процессов принятия решений.
- Статичность знаний: зависимость от обучающих данных, зафиксированных на момент обучения.

Для преодоления этих барьеров предлагается гибридная система, объединяющая три компонента:

- 1) LLM – источник креативности и гипотез,
- 2) символьная логика – строгая проверка гипотез,
- 3) мульти-блокчейн – децентрализованное хранилище знаний.

Дополнительно интегрируются:

- международный ИИ-комитет (IAIC. World) – для глобального регулирования и верификации знаний,
- децентрализованные стейблкоины (enigma.ist) – экономическая основа для стимулирования участников системы.

2. Задачный подход: формализация и иерархия знаний

2.1. Формализация задач

Любое взаимодействие с системой, будь то вопрос или запрос, рассматривается как задача,

которую необходимо решить. Система превращает неструктурированный запрос (например, «Как спрогнозировать спрос на стейблкоин?») в четкую задачу, где определяются условия, при которых можно получить ответ. Основная цель – найти оптимальное решение, которое соответствует заданным условиям. Например, если пользователь спрашивает, как управлять резервами стейблкоина, система формализует это как задачу поиска стратегии, учитывающей текущие данные о ликвидности и рыночные тенденции.

2.2. Вероятностная иерархия знаний

Знания в системе организованы в виде иерархической структуры, где каждое знание имеет оценку своей надежности и применимости. Чем более точно знание описывает ту или иную ситуацию и чем выше его проверенная точность, тем выше оно находится в иерархии. Например, информация о том, как управлять резервами стейблкоина в условиях стабильного рынка, может иметь высокий уровень доверия, тогда как аналогичная информация для волатильного рынка – более низкий. Это позволяет системе автоматически обновлять знания, отсеивать менее надежные данные и использовать наиболее проверенные факты для решения задач.

2.3. Роль международного ИИ-комитета IAIC

IAIC обеспечивает экспертную верификацию критических знаний через голосование на блокчейне. Например:

- одобрение изменений в алгоритме управления резервами стейблкоина,
- установление этических норм для ИИ в метавселенной.

3. Мульти-блокчейн: архитектура децентрализованной памяти

3.1. Определение мульти-блокчейна

Мульти-блокчейн строится по принципу иерархии, начиная с блокчейнов низшего уровня, который хранят сырые данные. В них можно писать много информации и быстро, нет децентрализации. На более верхних уровнях уже блокчейны имеют более высокую децентрализацию и безопасность, но меньшую масштабируемость. Они могут содержать уже выверенные правила и знания, полученные из фактов, хранящихся в низкоуровневых блокчейнах. Самый верхний уровень – мастер-блокчейн – координирует работу всех подчиненных блокчейнов, обеспечивая согласованность данных. Такая структура позволяет системе масштабироваться: новые уровни добавляются по мере усложнения задач, сохраняя при этом про-

зрачность и защиту информации. Например, если нужно проанализировать влияние региональных факторов на спрос стейблкоина, отдельные блокчейны собирают локальные данные, а мастер-блокчейн обобщает их для глобального прогноза.

3.2. Интеграция децентрализованных стейблкоинов

Стейблкоин **enigma.ist** интегрируется с мульти-блокчейном для:

- прозрачного учета обеспечения (ETH, BTC, недвижимость);
- автоматической проверки ликвидности резервов через смарт-контракты;
- вознаграждений участникам за поддержку системы (например, валидацию транзакций).

Пример:

- Уровень 1: блокчейн для учета транзакций **enigma.ist**.
- Уровень 2: подчиненные цепи для анализа спроса/предложения в регионах.
- Мастер-блокчейн: координация уровней и обновление алгоритмов управления резервами.

4. Метавселенная как среда для AGI

4.1. Многоагентная система (MAS)

Метавселенная трактуется как многоагентная система (MAS), где

- агенты (люди, ИИ, организации) взаимодействуют в виртуальном пространстве;
- эмерджентные явления (рынки, конфликты) моделируются через логико-вероятностные правила.

Пример:

- ИИ-агент прогнозирует спрос на стейблкоины в метавселенной, используя данные из блокчейна.
- Агенты конкурируют за вознаграждения в **enigma.ist** за точность прогнозов.

4.2. Социальный интеллект и этическое регулирование

IAIC.World устанавливает правила поведения агентов в метавселенной:

- запрет на манипуляции ценами стейблкоинов,
- защита приватности пользователей.

5. Преимущества гибридной системы

1. Устойчивость к галлюцинациям: проверка гипотез LLM через символическую логику и данные из блокчейна.

2. Непрерывное обучение: база знаний обновляется через взаимодействие агентов в метавселенной.

3. Экономическая устойчивость: стейблкоины с реальным и крипто-обеспечением минимизируют риски инфляции.

4. Глобальное регулирование: IAIC.World создает стандарты ИИ, совместимые с юридическими нормами.

6. Практические применения

Финансовый сектор:

- Стейблкоин **enigma.ist** как инструмент децентрализованного кредитования.
- ИИ-анализ рисков на основе вероятностной иерархии знаний.

Умные города:

- Цифровые двойники, управляемые AGI с доступом к блокчейн-данным о ресурсах.

Наука:

- Коллаборативные исследования с автоматической проверкой гипотез через символическую логику.

7. Вызовы и пути их решения

Юридические барьеры:

- Регистрация стейблкоина как товара (например, в Эль-Сальвадоре).

Масштабируемость:

- Использование решений второго уровня (Arbitrum, Polygon) для снижения комиссий.

Этика ИИ:

- IAIC.World разрабатывает принципы «честного ИИ», предотвращающие дискриминацию и манипуляции.

8. Заключение

Гибридная система объединяет мощь LLM, строгость логики и децентрализацию блокчейна, создавая экосистему для Сильного ИИ. Интеграция международного ИИ-комитета и децентрализованных стейблкоинов обеспечивает устойчивость, прозрачность и глобальную доступность технологии. Это открывает путь к автономным агентам, способным решать задачи с фиксированным бюджетом ресурсов, что критично для метавселенной и умных городов.

Литература

1. *Goncharov S., Nechesov A.* AI-Driven Digital Twins for Smart Cities. Eng. Proc. 2023, 58, 94. <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16223>.

2. *Nechesov A., Ruponen J.* Empowering Government Efficiency Through Civic Intelligence: Merging Artificial Intelligence and Blockchain for Smart Citizen Proposals // *Technologies*. 2024, 12, 271. <https://doi.org/10.3390/technologies12120271>.

3. *Nechesov A.* Learning Theory and Knowledge Hierarchy for Artificial Intelligence Systems // *IEEE, SIBIRCON, Novosibirsk*. 2024. P. 299–302. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON63777.2024.10758505>.

4. *Nechesov A., Dorokhov I., Ruponen J.* Virtual Cities: From Digital Twins to Autonomous AI Societies // *IEEE Access*. 2025. V. 13. P. 13866–13903. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3531222>.

5. Международный ИИ-комитет <https://IAIC.World>: Платформа для глобального регулирования ИИ.

6. Стейблкоин <https://enigma.ist>: Криптообеспеченная валюта с динамическим управлением резервами через ИИ-прогнозы.

Ресурсные диаграммы – удобный инструмент для описания вариантов динамики живых систем

И.В. Нуйдель¹, Л.А. Станкевич², В.Г. Яхно¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород;
nuidel@ipfran.ru, yakhno@ipfran.ru

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;
stankevich_lev@inbox.ru

Живую систему можно рассматривать как механизм, состоящий из связанных квазинезависимых и перенастраиваемых модулей, которые выполняют необходимые динамические режимы распознавания на пути преодоления «препятствий» для достижения поставленных целей. При этом поведение как изучаемой интегральной (иерархически структурированной) системы в целом, так и составляющих ее подсистем на различных этапах обработки и уровнях управленческих действий можно описывать, опираясь на схожие, универсальные принципы обработки сенсорных сигналов. Физическая методология при описании когнитивных систем опирается на экспериментальные данные, введение различных версий «имитационных» и «базовых» моделей, а также на динамические режимы, адекватно описывающие поведение природных прототипов.

Обычно «имитационные» модели ориентированы на возможность реализации таких операций или действий, которые до этого регистрировались только у естественных живых систем. Фактически разработки, в которых математические, программные и технические модели позволяют очень эффективно симулировать выполнение операций и действий живых прототипов, ориентированы на замену природных живых систем на модельные (технические) разработки-аналоги. Именно такие разработки получили сейчас наибольшую популярность. Обычно успехи таких разработок демонстрируются либо для четко определенных областей операционной деятельности, либо для ситуаций со стабильно определенными правилами функционирования. Известно множество примеров, когда даже небольшие изменения в заранее установленных разработчиками «условиях» использования «воспитанных» ими искусственных систем приводят к непредсказуемым ошибкам (часто весьма серьезным). Таким образом, попытки полностью заменить людей (а порой и живые системы с «человеческим строем психики») на искусственные «автоматы» вызывают чувства недоверия к получаемым с их помощью результатам. Справедливости ради, серьезные разработчики вынуждены сопровождать успехи ИИ призывами к необходимости также разработок и дополнительного инструментария, с помощью которого можно будет выявлять, объяснять причины ошибок ИИ, а затем, соответственно, и корректировать успешно найденные ошибки.

Одно из направлений на таком пути связано с использованием смысловых, «базовых» моделей,

построение которых основано на выявлении наиболее важных, смысловых переменных и параметров изучаемых систем, с последующим построением «балансных» уравнений для выделенных «объектов исследования». Такие модельные уравнения ориентированы на помощь исследователям в поиске возможных динамических режимов, качественно соответствующих основным поведенческим закономерностям изучаемой природной системы. Таким образом, смысловая модель помогает осознать заинтересованному исследователю, как можно описать поведение природного прототипа. Фактически с помощью таких смысловых моделей разрабатывается формализованный язык, объясняющий основные закономерности изучаемых процессов на понятной логике сопоставления решений математической модели с данными экспериментов. Кроме того, сами базовые математические модели и их решения можно интерпретировать как «кодированную форму» описания ключевых процессов в сложных «имитационных» моделях и, соответственно, в изучаемых ими природных прототипах на выбранных исследователем «огрубленных» уровнях для смысловых переменных.

Основополагающая роль в разработках смысловых моделей, несомненно, отводится схеме П.К. Анохина [1–3], который обратил внимание на существование важнейшего признака живой системы – опережающее отражение входного сигнала, а также обязательность учета выявляемых системообразующих факторов. В последующих работах других исследователей когнитивных систем, например, А.М. Иваницкого [4, 5] такое отражение реализуется в циклах возврата входного сенсорного сигнала (или *re-entry* по Дж.М. Эдельману). В.Я. Сергин [6, 7] ввел циклы самоотожествления.

Ряд исследователей [8–29] на основе своего жизненного опыта переводит различные исходно сложные схемы в упрощенные модельные версии. Например, статистические данные о результатах операций системы в циклах принятия решений [8, 11, 16–19] представлены через «ресурсные диаграммы» (рис. 1). На горизонтальной оси отложена величина ERR – ошибки (меры близости) между признаками ожидаемого и реально фиксируемого входного сигнала. Фактически учет «опережающего отражения» по П.К. Анохину, для каждого вида входного сенсорного потока заложен в значения переменной ERR. По вертикальной оси обозначаются величины ресурсов, необходимые системе для выполняемых операций. Все парамет-

ры (H_1 , H_2 , $P_{авт}$, P_{max} , $P_{фильтра}$) такой диаграммы строятся на основе данных о прошлом экспериментальном опыте работы рассматриваемой системы. В живых и технических системах распознавания выделяют как минимум три режима принятия решений (тернарный классификатор):

- режим при малой ошибке ($ERR < H_1$), не требующий дополнительной проверки. $P_{авт}$ – ресурсы, выделяемые на цикл «автоматической» операции;

- режим при значениях с промежуточной ошибкой ($H_1 < ERR < H_2$), когда в экспериментально выделенном диапазоне необходимо найти более точные алгоритмы, снижающие ошибку ниже порога H_1 . Ресурсы, затрачиваемые на такого типа операции, не должны превышать P_{max} ;

- режим при большой ошибке ($H_2 < ERR$), когда из «энергетических» соображений система фильтрует входной сигнал. $P_{фильтра}$ – ресурсы, выделяемые на цикл такой операции.

На рис. 1, А приведены основные элементы, участвующие в процедурах распознавания основного сенсорного потока, на который ориентирована первая подсистема рассматриваемого модуля [8, 11, 16–19]. Вторая подсистема, показанная на рис. 1, Б, отвечает за оценку уровня «пользы» (акцептор результата действия), которую всему функциональному модулю может приносить контроль за состоянием и перераспределением новых алгоритмов в первой подсистеме. Работа второй подсистемы демонстрирует возможные системообразующие факторы [2, 3, 27], которые объединяют такую двухуровневую структуру в единую распознающую систему-модуль. Величина ERR во второй подсистеме на рис. 1, Б соответствует ошибке (мере близости) между признаками ожидаемой и реально фиксируемой «пользы» контроля за работой первой подсистемы (рис. 1, А).

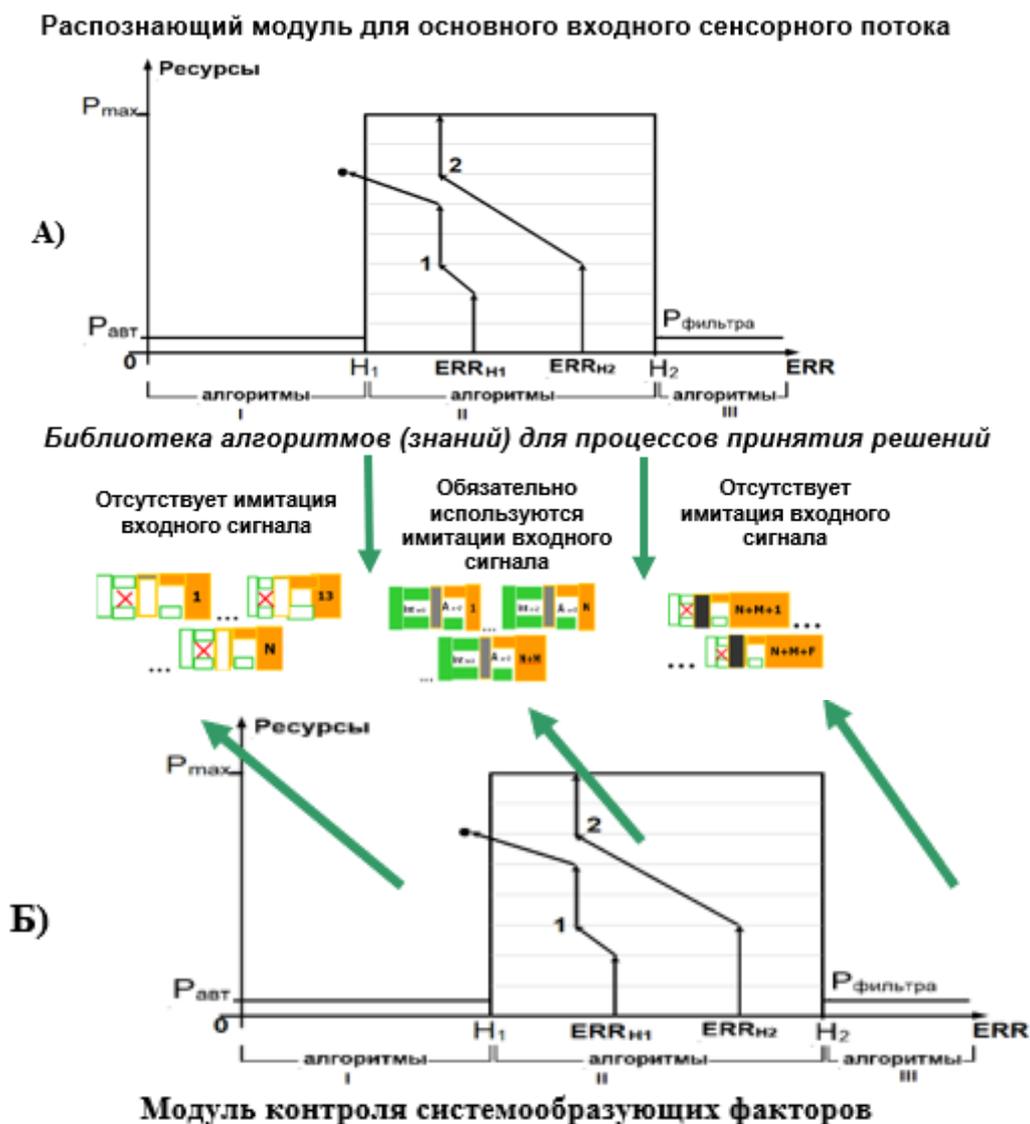


Рис. 1. Упрощенная схемная модель П.К. Анохина, представленная в виде ресурсных диаграмм. Основные параметры приведенных диаграмм могут быть измерены в специальных экспериментах, ориентированных на выявление разных режимов восприятия входного сигнала. А – ресурсная диаграмма для входного сенсорного потока; Б – ресурсная диаграмма для системообразующих факторов, контролирующих параметры успешной работы распознающей подсистемы для основного сенсорного потока (см. рис. А)

Известны данные (см., например, [4, 5]) о том, что запоминание событий живыми системами возможно только тогда, когда в операциях с сенсорными сигналами используются внутренние образы, сгенерированные моделью внешних сигналов (субъективная реальность). Опираясь на это знание, вполне оправданно провести аналогии между статистическими данными, связанными с инженерной практикой, и определениями специалистов, изучающих разнообразие состояний живых систем на «образном» языке.

В этом случае ресурсная диаграмма позволяет визуализировать и ввести количественные критерии, разделяющие основополагающие режимы поведения живых систем для изучаемого «квази-автономного распознающего модуля» [11, 14]:

а) бессознательное восприятие входного «образа» запускается малой величиной ошибки, также как включается режим фильтрации входного «образа» при большой ошибке, и эти бессознательные режимы основаны на алгоритмах (знаниях) прошлого опыта. Он был накоплен в результате успешного выполнения необходимых системе функциональных операций;

б) элементарный процесс «сознания» (или «осознания») связан с внутренней имитацией образа входного сенсорного сигнала при ошибках в экспериментально заданном диапазоне для процедуры поиска таких новых алгоритмов распознавания, которые могут снизить получаемую ошибку до требуемых малых величин. Выполняемые настройки ориентированы на процессы оптимизации (через циклы настройки) и повышение точности работы распознающего модуля [11, 14, 22, 28];

в) интуитивные режимы восприятия включаются в случаях, когда заканчиваются ресурсы, исходно выделенные системой для осознанного поиска новых, более точных алгоритмов распознавания. Это означает, что текущая ситуация (входные образы, области функционирования) существенно отличается от предыдущего успешного опыта, и поэтому система вынуждена обращаться за помощью к более «продвинутым» когнитивным системам во внешней среде. Варианты процедур получения помощи «извне» могут быть очень разнообразными (и по времени, и по объему затрачиваемых ресурсов), включая прохождение этапов стрессовых состояний [19]. Примеры таких процедур [14–17, 19–21] выведены за рамки данного текста и оставлены для устного обсуждения. Главное, на что следует обратить внимание: интуитивное восприятие и обучение обеспечивается сигналами из «внешних» источников для системы с недостаточным объемом знаний.

Почему, казалось бы, очевидные формализованные критерии разделения основополагающих режимов распознавания в живых системах с таким трудом находят взаимопонимание в языке обсуждений заинтересованных специалистов-исследователей? Можно отметить, например, следующие обстоятельства.

– Многоуровневые иерархические архитектуры изучаемых живых систем позволяют реализо-

вать настолько широкий спектр возможных динамических режимов функционирования, что даже заинтересованным исследователям трудно согласовать, какие виды цепочек из динамических процессов восприятия, а также достижение каких поставленных целей они рассматривают.

– Оптимизация процессов принятия решений в имитационных моделях может быть весьма разнообразной, поэтому формулировка правдоподобной интерпретации результатов очень сильно зависит от конкретных деталей рассматриваемых ситуаций [15–27], которые часто по умолчанию остаются в «скрытом» состоянии.

– Важно учитывать также тысячелетние наработки буддийских исследователей. Зная о существовании миллионов «ментальных факторов» (аналога настроечных режимов из «элементарных сознаний»), они предпочитают выбирать среди них только те интегральные переменные, которые связаны с «благоприятными» путями познания и целенаправленно избегают пути «недоверного», дурного познания (см., например, [29, 30]).

– Наверняка существуют и другие обстоятельства, препятствующие взаимопониманию: в частности, непредсказуемые социальные процессы или природные катастрофы.

В качестве одного из перспективных направлений следует отметить результаты работы [31], показавшие, что в процессе развития живые системы на основе приобретенных ими потенциалов (сгенерированных планов) и реализации этих «задумок» могут повышать эффективность своего существования благодаря формированию огромного числа вариантов путей обработки, связанных с разделением труда по выполнению специализированных операций в создаваемых для этого ассоциациях элементов (называемых гистионами или соционами, по Г.А. Савостьянову) [31]. Таким образом, существующие ныне теоретические подходы, несомненно, позволяют описывать весьма широкий диапазон поведенческих реакций живых систем. Потребность в развитии смыслового языка описания, использующего только лишь основные переменные для изучаемого этапа функционирования, позволяет повысить доверие и к сложным численным расчетам.

Дальнейшая разработка инструментария «ресурсные диаграммы» для смыслового моделирования механизмов и режимов функционирования живых систем, а также структур их коллективной активности в популяциях, по нашему мнению, имеет широкие перспективы для развития. Поэтому необходимо предлагать к обсуждению успешные элементы такого языка при описании природных закономерностей.

Работа профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН, проект № FFUF-2024-0037.

Литература

1. Анохин П.К. Проблема центра и периферии в современной физиологии нервной деятельности. В кн.:

- Проблема центра и периферии в нервной деятельности. Горький, 1935. С. 9–70.
2. Анохин П.К. Теория функциональной системы как предпосылка к построению физиологической кибернетики // Биологические аспекты кибернетики. М. : АН СССР, 1962.
 3. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. В кн.: Избранные труды. Философские аспекты теории функциональной системы. М. : Наука, 1978. С. 49–106.
 4. Иваницкий А.М. Мозговые механизмы оценки сигналов // М. : Медицина, 1976.
 5. Иваницкий А.М. Главная загадка природы: как на основе работы мозга возникают субъективные переживания // Психологический журнал. 1999. Т. 20, № 3. С. 93–104.
 6. Сергин В.Я. Психофизиологические механизмы осознания: гипотеза самоотожествления // Журн. высш. нерв. деят. 1998. 48 (3): 558–571.
 7. Сергин В.Я. Автоотождествление и сенсорно-моторное повторение как физиологические механизмы сознания // Журн. высш. нерв. деят. 2020. 66 (2): 1–20.
 8. 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 г. United States Patent No **US 6,751,353 B1** Jun. 15, 2004.
 9. Tononi G. An information theory of consciousness // BMC Neuroscience, 2004. 02 November.
 10. Внутренний предиктор СССР. Основы социологии. Санкт-Петербург, 2010: <http://kob.su/kobbooks/osnovy-sotsiologii>.
 11. Яхно В.Г. Модели нейроноподобных систем. Динамические режимы преобразования информации // Материалы школы «Нелинейные волны-2002». Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2003. С. 90–114.
 12. Нуйдель И.В., Соколов М.Е., Кузнецова Г.Д., Яхно В.Г. Моделирование динамических процессов преобразования сенсорных сигналов в таламо-кортикальных сетях // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. № 6. С. 117–129.
 13. 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. V. 1358. P. 359–367. DOI: 10.1007/978-3-030-71637-0 41.
 14. Нуйдель И.В., Колосов А.В., Пермяков С.А., Егоров И.С., Полевая С.А., Яхно В.Г. Математическая модель управления нейропластичностью мозга при нейробиоуправлении // Известия вузов. ПНД. 2024. Т. 32, № 4. С. 472–491. DOI: 10.18500/0869-6632-003109. EDN: СААКСН.
 15. Малышев С.А., Яхно В.Г. Версия биоморфной системы навигации // Известия вузов. ПНД. 2024. Т. 32, № 5. С. 606–624. DOI: 10.18500/0869-6632-003107. EDN: BUSCAO.
 16. Головина А.А., Яхно В.Г. Упрощенные модели для описания многозадачных режимов в живых распознающих системах // Изв. вузов. ПНД. 2025. Т. 33, № 3. С. 361–380. DOI: 10.18500/0869-6632-003148. EDN: CMDASL.
 17. Яхно В.Г., Макаренко Н.Г. Поможет ли нам создание «Цифрового двойника человека» лучше понимать друг друга? // Подходы к моделированию мышления / Под ред. В.Г. Редько. М. : ЛЕНАНД, 2014. С. 169–202.
 18. Караулов Ю.Н. Концептография языковой картины мира. Статья 1. Первый этап «восхождения» к образу мира: от элементарных фигур знания к предметно-референтным областям культуры // Проблемы прикладной лингвистики. 2004. Вып. 2.
 19. Yakhno V., Parin S., Poleyava 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. 2021. P. 10–33. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-60577-3>.
 20. Анохин К.В. Когнитом: в поисках фундаментальной нейронаучной теории сознания // Журн. высш. нерв. деят. 2021. Т. 71, № 1. С. 39–71.
 21. Вартанов А.В. Механизмы семантики: сознание – мозг. М. : Акрополь, 2023. 399 с.
 22. Аллахвердов В.М. Сознание как парадокс // Экспериментальная психология, т. 1. СПб. : Издательство ДНК, 2000.
 23. Шумский С.А. Машинный интеллект. Очерки по теории машинного обучения и искусственного интеллекта. М. : РИОР, 2019. 340 с.
 24. Станкевич Л.А. Когнитивные системы и роботы : монография. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 631 с.
 25. Станкевич Л.А., Бахшиев А.В., Лопота А.В. Гуманоидные роботы: монография. СПб. : Медиапайр, 2020. 310 с.
 26. Хазин М.Л., Щеглов С. Лестница в небо. Диалоги о власти, карьере и мировой элите. М. : РИПОЛ классик, 2022. 624 с.
 27. Черноиванов В.И., Толоконников Г.К. Основы теории биомашсистем. М. : Росинформротех, 2024. 303 с.
 28. Парин С.Б. Пути сознания. Учебное пособие. Нижний Новгород : Изд. ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2025. 208 с.
 29. Природа сознания. Беседы Далай-ламы с российскими учеными. Материалы Первой международной конференции «Фундаментальное знание: диалог российских и буддийских ученых». Август 2017 г. / сост. и отв. ред. В. Лысенко; ред. пер. Ю. Жиронкина. М. : Фонд «Сохраним Тибет», 2023. 400 с.
 30. Тибетская йога и тайные учения или семь книг о мудрости великого пути / Редакция, введение и комментарии У.Й. Эванса-Вентца. М. : ФАИР-ПРЕСС, 2001. 480 с.
 31. Савостьянов Г.А. Теория разделения труда как основа развития в биологии и обществе. СПб. : ИЭФБ РАН, 2023. 234 с.

Электрические рыбы, формирование образов электрических событий и идеи умвельта/гегенвельта Якоба фон Иксюля

В.М. Ольшанский

Институт проблем экологии и эволюции РАН, Москва;
vmolsh@yandex.ru

Введение

Настоящий доклад продолжает разговор о фундаментальных основах формирования образов электрических полей, начатый на конференциях 2019 и 2023 гг. [1, 2]. Конкретная проблема, в которой мы хотим продвинуться, – научиться создавать динамические образы электрических событий, происходящих в реальной жизни рыб и других водных животных.

В 50-е годы Ханс Лиссманн предположил [3], что рыбы осуществляют локацию объектов, ориентацию в окружающей их среде и коммуникацию с помощью генерируемых ими электрических разрядов и распределенных по всему телу электрорецепторов. Лиссманн назвал эту систему «electrical retina», а в качестве образов, иллюстрирующих принцип электролокации, привел картины линий тока и эквипотенциалей, искажаемых находящимися вблизи рыб объектами. Совместно с Кеном Мэйчином [4] были предложены физические модели, позволяющие сделать количественные оценки возможностей электролокации, и экспериментально установлены пороги электровосприятия. После открытий Лиссманна в 70-е годы была описана морфология и физиология электрорецепторов разных типов, а в 80–90-е нейрофизиология центральной обработки электросенсорной информации [5–7]. Работы по физическому моделированию электролокации также осуществлялись сразу после публикации Лиссманна и Мэйчина, но в последние годы наблюдается взрывной рост количества таких работ, ключевыми словом которых является *Imaging* применительно к активной электролокации рыб [8, 9].

Основой предлагаемых при моделировании электрических рыб образов являются картины линий тока (распределений потенциалов) и осциллограммы. За каждым из этих образов лежит традиция, сложившаяся на рубеже 18–19 веков [7]. Линии тока активно и эффективно использовали Кавендиш, Фарадей, Кирхгофф и Максвелл, а осциллограммы – Гельмгольц и Маттеуччи. Более того, открытия Лиссманна стали возможны благодаря тому, что в его распоряжении был осциллограф и он первым применил его к регистрации электрических разрядов *Gymnarchus niloticus* [3].

Следуя идеям Лиссманна, мы разработали и изготовили комплекс визуализации электрических полей рыб [10], представляющий собой модель той самой «электрической сетчатки», о которой он писал.

Однако из того, что известно про нейрофизиологию рыб [6, 11] следует, что рыбы формируют

совсем иные образы электрических событий, чем картины эквипотенциалей и осциллограммы. Проблема состоит в том, чтобы предложить новый тип образов электрических событий, эффективно отображающий их динамику, учитывающий особенности обработки информации электрическими рыбами и адекватный человеческому восприятию.

Принципы формирования образов – одна из базовых задач фундаментальной науки. Само слово «образование», обозначающее накопление и передачу через поколения общечеловеческих представлений о мире, связано со словом «образ».

В предыдущих докладах на наших конференциях говорилось про Ньютона и Дарвина как об авторах двух систем мира, а о Кавендише, Фарадее и Максвелле – как о создателях традиции электрических образов. Сегодня я хочу больше уделить внимание другому создателю системы представлений о мире – барону Якобу фон Иксюлю. Первая научная публикация Лиссманна [12] была сделана под руководством Иксюля и содержала прямые ссылки на его базовые работы.

Идеи умвельта и гегенвельта

У Якоба фон Иксюля было очень много публикаций, но практически все на немецком языке. Наиболее известны три книги – «Umwelt und Innenwelt der Tiere» [13], изданная в 1909 г., «Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen», изданная в 1935 г., и «Bedeutungslehre», 1940. Две последних книги были изданы в 2025 г. под общей обложкой на русском языке «Путешествие в окружающие миры животных и людей. Теория значения» [14].

Согласно Иксюлю каждое существо живет на границе двух миров: *Wirkwelt* – реальный мир и *Merkwelt* – странный мир. Более того, у каждого существа свой *Wirkwelt*, для которого Иксюль ввел термин умвельт. Умвельт – это то, что существо воспринимает и на что оно может воздействовать. И у каждого существа свой *Merkwelt* – он называется гегенвельтом. Гегенвельт – это уже воспринятый мир, в котором собственно и принимаются решения. Если брать аналогию с современными техническими устройствами, то умвельт соответствует аналоговой части, включающей различные сенсоры и исполнительные механизмы, а гегенвельт – цифровой части, которая обрабатывает входную информацию и формирует команды на исполнение. Однако для Иксюля крайне принципиально, что живые существа не являются механизмами. Этому вопросу он уделяет много внимания, особенно в книге [13]. Следует, однако,

отметить, что во времена Иксюля не существовало цифровой техники и механизмов, свойства которых аналогичны свойствам субъектов, включая адаптивное автономное поведение и самообучение.

Иксюль vs Ньютон и Дарвин

В прошлых докладах в качестве двух базовых систем мира были названы системы мира Ньютона и Дарвина. Они, вообще говоря, не противоречат друг другу. У них разные основания и приоритеты: Ньютон полагает, что мир построен Богом на основании математических законов, что любое движение любого тела можно вывести из нескольких базовых принципов и что задача физики – это объяснить, как различные движения следуют из этих постулатов. Базовая идея Ньютона [15] – что в основе мира лежат созданные Богом математические законы – в последнее время активно оспариваются профессиональными физиками, например, Сабиной Хоссенфельдер [16]. Дарвин не пишет ни о ньютоновых постулатах, ни о математических законах, но полагает, что все имеет длинную эволюционную историю, в которой каждое существо пыталось действовать исходя из пользы для своего вида. И Ньютон, и Дарвин признают реальность и единство окружающего нас мира, и в этом смысле, являются материалистами. Наиболее отчетливо различие представлений Иксюля от систем мира Ньютона и Дарвина характеризует следующая цитата из книги [13]: *«Но очень важно, когда материалистические демагоги пытаются убедить нас в том, что "умвельт камней", который является лишь мысленной абстракцией окружающей нас действительности, более реален, чем [умвельт наблюдателя]. Несмотря на то, что в окружении камней нет никаких предметов, а есть только хаос танцующих точек, эта самая бледная из всех мыслимых конструкций должна быть более реальной, чем все, что окружает нас в виде реальных предметов. Пожалуй, пришло время окончательно разобраться с этим мракобесием, достойным алхимика.»* Если сравнить это с высказыванием Ньютона из «Математических начал натурфилософии» [15] – *«Мы видим лишь образы и цвета тел, слышим лишь звуки, ощущаем лишь наружные поверхности, чуем лишь запахи и чувствуем вкусы: внутреннюю же сущность никаким чувством, никаким действием мысли не постигаем»*, то прав скорее Иксюль – все образы объектов мы создаем в своем гегенвельте. И помимо тех из них, которые соответствуют реальному миру, в нашем гегенвельте много абстрактных образов и мысленных конструкций, например, иллюстраций к задачам Ньютоновой механики. Но помимо них в гегенвельте есть образы реальных объектов, существующих независимо от того, кто их воспринимает и воспринимает ли их хоть кто-то. Язвительный вопрос Эйнштейна – «Существует ли Луна, когда мы на нее не смотрим?» – и у Ньютона и у Дарвина получил бы положительный ответ. А вот у Иксюля все

миры субъективны. Единого объективного мира нет. Любой объект обретает содержание только в чем-то умвельте.

Еще интереснее сравнить приведенные слова Иксюля с представлениями Дарвина. Дарвин первоначально пришел в науку как геолог, и эволюционные идеи воспринял прежде всего как геологические [17]. Не только любое существо, но и любой камень имеет свою эволюционную историю. В этом смысле странно говорить о хаосе материальных объектов.

Иксюль в последние годы своей жизни перешел к резкой критике Дарвина. Между тем и идея умвельта и идея гегенвельта интересны именно в свете эволюционной теории: как конкретно у разных видов животных происходила эволюция их способностей воспринимать мир, формировать модели мира и трансформировать свою окружающую среду.

Почему идеи Иксюля очень полезны для продвижения в проблеме формирования образов

На примере исследований электрических рыб хорошо видно, насколько плодотворными могут быть идеи Иксюля. Первая работа Лиссмманна [12] – это попытка понять объект исследований – бойцовых петушков – как единое существо. Какие у них могут быть приоритеты? Какие у них сенсорные и эффекторные возможности? В каком ритме времени они живут? Позже именно такой подход привел Лиссмманна к успеху в открытии электролокации – посмотреть на гимнарха как на целое, связать в единый образ его манеру локации, наличие электрического органа, наличие ампулярных рецепторов, гипертрофированный мозг.

Идеи Иксюля не только позволяют вообразить гегенвельты разных существ, но и позволяют их экспериментально исследовать. По сути, Лиссмманн дал прямой положительный экспериментальный ответ на вопрос: можем ли мы продвигаться в понимании внутреннего мира другого существа, если у него другие рецепторы, другие приоритеты, другая среда обитания? Важно, что основная методика Лиссмманна – поведенческая. Лиссмманн задавал вопросы гимнарху о том, что он может/не может, различает/не различает. И получал надежные ответы. Это прямой диалог «человек-рыба» через гегенвельты.

Еще один пример – экспериментальная работа Алисы Уолтон и Питера Моллера по поведению мормирид в лабиринте [18]. Мормирид научили проходить сложный лабиринт, а потом убрали стенки. И видеозапись эксперимента показывает, что мормириды движутся не в реальном мире, а в гегенвельте – по модели мира, выстроенной в голове.

Если вернуться к цитате из Иксюля о «самой бледной из мыслимых абстракций», то образы миров, которые предлагает Иксюль, действительно несоизмеримо богаче, чем физико-матема-

тические модели или описания физиологических механизмов. Соответственно труды Икскюля (желательно с учетом эволюционной теории) дают основу для формирования новых типов образов, в том числе образов электрических событий, происходящих в водной среде.

Литература

1. *Ольшанский В.М.* Становление электродинамики как модельный эволюционный эксперимент. Мучительная проблема истинности животного электричества // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях-2019. Нижний Новгород : ИПФ РАН. С. 135–136.
2. *Ольшанский В.М., Зленко Д.В.* Формирование образов электрического поля и попытка преодолеть внутривидовой барьер // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях-2021. Нижний Новгород : ИПФ РАН. С. 90–93.
3. *Lissmann H.W.* On the function and evolution of electric organs in fish // *J. Exp. Biol.* 1958. V. 35. P. 156–191.
4. *Lissmann H., Machin K.E.* The mechanism of object location in *Gymnarchus niloticus* and similar fish // *Journal of Experimental Biology*. 1958. 35(2):451–486. DOI 10.1242/jeb.35.2.451.
5. *Electroreception* / Ed. Т.Н. Bullock, W. Heiligenberg. N. Y. : Wiley, 1986. 722 p.
6. *Carlson B.A., Sisneros J.A., Popper A.N., Fay R.R. (eds).* *Electroreception: Fundamental Insights from Comparative Approaches.* Springer Nature, Cham, Switzerland, 2019.
7. *Ольшанский В.М., Барон В.Д., Еоин Макмагон, Зленко Д.В.* Электрические рыбы как объект фундаментальных исследований // *Изв. вузов. ПНД.* 2023. № 6. С. 776–812.
8. *Pedraja F., Aguilera P., Caputi A.A., Budelli R.* Electric imaging through evolution, a modeling study of commonalities and differences // *PLoS Comput Biol.* 2014 Jul 10;10(7):e1003722. doi: 10.1371/journal.pcbi.1003722.
9. *Von der Emde G., Schwarz S.* Imaging of objects through active electrolocation in *Gnathonemus petersii* // *J. Physiol Paris.* 2002. Sep–Dec; 96(5–6):431–44. doi: 10.1016/S0928-4257(03)00021-4.
10. *Olshanskiy V.M., Orlov A.A., Kasumyan A.O., MacMahon E., Xue W., Moller P.* Visualization of Electric Fields and Associated Behavior in Fish and other Aquatic Animals // *Behavior Research Methods.* 2024. Aug; 56(5):4255–4276. doi 10.3758/s13428-023-02175-5.
11. *Heiligenberg W.* *Neural Nets in Electric Fish* // Cambridge, MA : MIT Press, 1991.
12. *Lissmann H.W.* Die Umwelt des Kampffisches (*Betta splendens* Regan). *Z. f. vergl. Physiologie* 18, 65–111 (1932). <https://doi.org/10.1007/BF00338153>.
13. *Uexküll J. J.* *Umwelt und Innenwelt der Tiere.* Berlin : Verlag von Julius Springer, 1909.
14. *Икскюль Я.* Путешествие в окружающие миры животных и людей. Теория значения. М. : Ad Marginem, 2025.
15. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии. М. : Наука, 1989. ISBN 5-02-000747-1.
16. *Хоссенфельдер С.* Уродливая Вселенная: как поиски красоты заводят физиков в тупик. М. : Изд. Бомбора, 2021.
17. *Дарвин Ч.* Воспоминание о развитии моего ума и характера. М. : Изд. АН СССР, 1959.
18. *Walton A.G. & Moller P.* Maze learning and recall in a weakly electric fish, *Mormyrus rume probosciostris* Boulenger (Mormyridae, Teleostei) // *Ethology.* 2010. 116 (10), 904–919. Doi: 10.1111/j.1439-0310.2010.01807.

Нижегородская нейронаука в лицах

С.Б. Парин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
parins@mail.ru

Введение: о И.М. Сеченове

Становление и развитие нейрофизиологии и когнитивных исследований в Нижнем Новгороде неотделимо от их развития в России. Формально, вся российская нейрофизиология началась именно с Нижегородской губернии, ведь в 1829 году в селе Теплый Стан (ныне Сеченово) Симбирской (позднее – Нижегородской) губернии родился великий физиолог, основатель системной нейрофизиологии Иван Михайлович Сеченов (1829–1905). До 14 лет он не выезжал за пределы родного села, сумев получить при этом фундаментальное образование, что позднее помогло ему поступить в Главное инженерное училище (Санкт-Петербург), а затем – на медицинский факультет Московского университета. Однако, повторю, это в значительной степени формально, потому что нет никаких достоверных данных о том, что И.М. Сеченов проводил какие-либо нейрофизиологические эксперименты именно в родительском поместье, где он бывал и после получения высшего образования.

Нижегородская школа: П.К. Анохин

По существу, начало нейронаучных исследований в Нижнем Новгороде следует отсчитывать с 1930 года, когда на должность заведующего кафедрой физиологии медицинского факультета Нижегородского (с 1932 по 1990 – Горьковского) университета им. Н.И. Лобачевского был избран по конкурсу выдающийся системный нейрофизиолог, один из истинных основателей современной когнитивной науки, академик АМН СССР и АН СССР Петр Кузьмич Анохин (1898–1974). В том же 1930 году из состава медицинского факультета университета был выделен Нижегородский медицинский институт, и Петр Кузьмич стал одновременно еще и заведующим кафедрой нормальной физиологии новообретенного вуза. За 5 лет заведования кафедрами (до 1935 года) П.К. Анохин сумел заложить в Нижнем Новгороде основы современной (на тот период) нейрофизиологической школы, которая веером распространилась как минимум на 3 нижегородских вуза: ННГУ (ГГУ) им. Н.И. Лобачевского, ГМИ им. П.М. Кирова (позже – НижГМА, и еще позже – ПИМУ) и ГГПИ им. М. Горького (ныне – Мининский университет), и несколько исследовательских институтов (НИИ ПМК, НИРФИ, ИПФ РАН).

Принципиально важно, что Петром Кузьмичом Анохиным именно в Нижнем Новгороде за короткие 5 лет были заложены основы современной системной нейрофизиологии и когнитивной науки. Непослушный ученик Ивана Петровича

Павлова (а с нобелевским лауреатом спорить было чревато), П.К. Анохин в период работы в Нижнем Новгороде впервые опубликовал наброски той самой схемы функциональной системы, которая стала одним из базовых элементов когнитивной науки.

Считаю необходимым в двух словах объяснить принципиальную разницу классической рефлекторной теории и теории функциональных систем П.К. Анохина (рис. 1).



Рис. 1. Принципиальные отличия рефлекторной теории И.М. Сеченова – И.П. Павлова (вверху) от теории функциональных систем П.К. Анохина (внизу)

Рефлекторная теория для своего времени была абсолютно адекватной и даже революционной (неслучайно книга И.М. Сеченова «Рефлексы головного мозга» была запрещена в России на следующий день после выхода из типографии). Ее главный смысл заключался в том, что обсуждению и интерпретации подлежат исключительно объективно измеренные параметры системы.

На период формирования рефлекторной теории (XVII – первая треть XX века) реально измеряемыми были параметры стимулов и отчасти параметры ответного действия. Мозг трактовался как черный ящик, и все изыски нарождавшейся психологии рассматривались как плоды неумейной фантазии (по отношению к психологии это, к несчастью, актуально и сегодня, да простит меня К. Лешли).

Но XX век привнес в нейронауки целый арсенал физических, химических и математических методов. Появилась возможность объективного измерения параметров такой сверхсложной системы, как мозг, и, в некоторой мере, его продукта – сознания. П.К. Анохин в своей функциональной системе впервые показал, что «черный ящик» содержит множество измеряемых сущностей и внимание исследователей может и должно быть перенесено в измерение этих, уже доступных, параметров. Принципиальным было введение или уточнение П.К. Анохиным таких понятий, как целеполагание (основа поведенческого акта), акцептор результата действия (эталон получаемого результата, выраженный в конкретных параметрах), обратные и опережающие связи (feedback и feedforward – в современной понимании) и т. д. Но главное – теория функциональных систем, предвосхитив рождение кибернетики и когнитивной науки, сумела сместить акцент нейронаучных исследований из внешнего во внутренний мир человека и животных.

Есть непроверенные отрывочные воспоминания сотрудников Петра Кузьмича того периода: одним из стимулов к созданию стройной концепции функциональных систем стало его стремление доказать свою правоту учителю – И.П. Павлову. И надо отдать должное нобелевскому лауреату: он (возможно, не без колебаний) принял аргументацию П.К. Анохина.

В целом теория П.К. Анохина прошла в дальнейшем все этапы, характерные для принципиально нового взгляда на всем давно известный феномен: от полного отрицания и преследования (интересующиеся могут почитать подметные письма в Политбюро ЦК ВКП(б) неких, с позволения сказать, «психологов» Теплова и Небылицына – они есть в свободном доступе) до признания их одной из основ современной когнитивной науки.

Относительно короткое пребывание П.К. Анохина на поволжской земле принесло, пусть и в неявном виде, отсроченные плоды.

Горьковский (Нижегородский) университет

В Горьковском университете оставленную Анохиным кафедру возглавил один из его учеников – доцент Алексей Николаевич Черневский. Его исследования были направлены на изучение распространения нервных импульсов в центральной нервной системе. Скоропостижная смерть А.Н. Черневского в 1942 году оборвала начатое направление.

В 1943 году кафедру физиологии в ГГУ возглавил ученик члена-корреспондента АН СССР Х.С. Коштоянца Николай Михайлович Артемов (1908–2005). Из Института эволюционной морфологии им. А.Н. Северцова АН СССР он привез ставшую впоследствии на долгие десятилетия базой для кафедры новую тему: исследование физиологических механизмов действия зоотоксинов (животных ядов). Любопытно, что зоотоксины для исследований добывались непосредственно сотрудниками кафедры во время регулярных экспедиций, охвативших почти всю территорию СССР. Одним из главных направлений исследований стало изучение механизмов нейротоксического (а в малых дозах – нейротропного) действия зоотоксинов. Такие биологические свойства выявились и у ядов перепончатокрылых насекомых (пчелы, осы, шмели, шершни, филанты), и у токсинов змей (гадюка, гюрза, эфа, щитомордник, различные виды кобры), и у ядов земноводных (жабы, саламандра, жерлянки), и у токсинов паукообразных (скорпионы, тарантул, каракурт, аргиопа), и у актиний, и у многих других. Соответственно, исследования велись и на уровне отдельных нейронов, и на системном нейрофизиологическом уровне. Кроме чисто академического интереса, работы принесли ряд практических результатов, начиная с разработки методов детоксикации и заканчивая созданием целой линейки лекарственных препаратов на основе зоотоксинов.

Из школы профессора, доктора биологических наук Н.М. Артемова вышла целая плеяда исследователей, развивавших нейрофизиологический подход в различных по целям проектах: доктора биологических наук Б.Н. Орлов, Д.Б. Гелашвили, С.Б. Парин, А.Е. Хомутов, множество кандидатов наук.

Особенно необходимо остановиться на личности такого выдающегося нейрофизиолога, выпускника Горьковского университета, как доктор биологических наук Александр Васильевич Зевеке (1923–2013). Его работа в ГГУ (ННГУ), Институте прикладной математики и кибернетики ГГУ, Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) и НижГМА неизменно была посвящена изучению механизмов кожной чувствительности. Большую часть XX века в сенсорной нейрофизиологии доминировало умозрительное мнение немецкого физиолога Максимилиана фон Фрея о наличии специализированных болевых, тепловых и холодовых рецепторов кожи. А.В. Зевеке был одним из тех немногочисленных нейрофизиологов планеты, кто на основании результатов изящных экспериментов упорно отстаивал противоположную точку зрения: ощущения тепла, холода и боли кодируются интегральной структурной сенсорного потока в волокнах кожных нервов. В коже нет термометров и тем более ноцицепторов, да и эволюционная необходимость в них отсутствует. Существует только 2 вида сенсорных рецепторов: механоцепторы и хемоцепторы. Теперь это настолько очевидно, что вошло в мировые учебники по нейрофизиологии. Однако Алек-

сандру Васильевичу почти всю жизнь приходилось решительно отстаивать правоту своей позиции. Только в 2013 году ему и его ученицам д.б.н. Софье Александровне Полевой и к.б.н. Екатерине Давидовне Ефес удалось опубликовать проблемную статью в одном из ведущих мировых нейрофизиологических журналов, и Александр Васильевич успел увидеть эту публикацию. С тех пор не проходит и месяца, чтобы не приходили запросы на право ее цитирования. Отсутствие термостатов и ноцицепторов подвергается сомнению только со стороны коммерсантов от науки.

Наряду с уже упоминавшимися С.А. Полевой и Е.Д. Ефес, учениками А.В. Зевеке стали такие нейрофизиологи, как д.б.н. О.С. Гладышева, к.б.н. Г.И. Малышева, к.б.н. О.В. Барина.

Сегодня системная нейрофизиология в ННГУ им. Н.И. Лобачевского успешно развивается на кафедре психофизиологии, которой руководит д.б.н. С.А. Полевая. Исследования кафедры сосредоточены на изучении нейрофизиологических механизмов формирования оптимальных и экстремальных функциональных состояний и разработке методов их экспресс-диагностики и коррекции. Лаборатория когнитивной психофизиологии при кафедре (заведующий – президент МАКИ, д.б.н. Сергей Борисович Парин) сосредоточена на изучении нейроэндокринных механизмов формирования стресса.

Исследовательская работа кафедры осуществляется в тесном и многолетнем сотрудничестве с Институтом прикладной физики РАН (отдел радиофизических методов в медицине). Совместно с д.ф.-м.н. Владимиром Григорьевичем Яхно и его сотрудниками к.ф.-м.н. Ириной Владимировной Нуйдель, Евгением Викторовичем Ереминым, Андреем Викторовичем Ковальчуком и другими разрабатываются нейроподобные математические модели функциональных состояний.

На биологический факультет ННГУ им. Н.И. Лобачевского по приглашению академика РАН Александра Михайловича Сергеева в 2014 г. приехал из Японии выдающийся молодой нейрофизиолог, один из авторов трехкомпонентной теории мозга (нейроны – глия – межклеточный матрикс), д.б.н., член-корреспондент РАН, ныне заместитель директора Института биоорганической химии имени М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова, заведующий отделом молекулярной нейробиологии и лабораторией внесинаптической передачи того же института Алексей Васильевич Семьянов. За короткий период пребывания в ННГУ он сумел организовать и оснастить самым современным нейрофизиологическим оборудованием НИИ нейронаук при ННГУ (возглавив его), создать вошедший в *Scopus* журнал «*Opera Medica et Physiologica*» и стать его главным редактором, преобразовать биологический факультет в Институт биологии и биомедицины (возглавив и его тоже) и заложить основу для целого комплекса нейрофизиологических исследований. К сожалению, тогдашнее руководство ННГУ не простило ему избрание в РАН и в 2016 году вынудило по-

кинуть Нижний Новгород. Созданный им, казалось бы, на долгие годы задел оказался востребованным лишь отчасти. Уникальный шанс вывести нейронауку в Нижнем Новгороде на высший мировой уровень не был реализован.

ГМИ – НижГМА – ПИМУ

Кафедру нормальной физиологии ГМИ им. С.М. Кирова после отъезда П.К. Анохина в 1935 году возглавил его соратник, ученик И.П. Павлова член-корреспондент АМН СССР Михаил Александрович Усиевич (1889–1970). На полтора десятка лет (до 1950 года) усилия кафедры были сосредоточены на проблеме влияния различных функциональных состояний больших полушарий головного мозга на деятельность внутренних органов (по сути, проблема кортико-висцеральных отношений) и связи типологических особенностей высшей нервной деятельности с характером протекания вегетативных процессов в организме.

В 1955 году заведующим кафедрой был избран доктор биологических наук, член-корреспондент АМН СССР Никита Юрьевич Беленков (1917–1986), сотрудник академика АМН СССР П.С. Купалова, ближайшего ученика И.П. Павлова. За 19 лет (до 1973 года) руководства кафедрой Никита Юрьевич сумел создать собственную нейрофизиологическую школу и вырастить таких незаурядных учеников, как доктор медицинских наук М.Ю. Ульянов, Н.А. Тартыгин, Г.Н. Сметанкин, А.Т. Абакаров, В.А. Сосенков, В.И. Щербаков, В.Д. Чирков, Т.Е. Калинина и др.

В центре внимания сотрудников кафедры были вопросы изучения роли коры и подкорковых структур в регуляции вегетативных функций, роли височной коры в эпилептогенезе, функций ретикулярной формации ствола головного мозга, нейрофизиологических механизмов ряда сенсорных функций (прежде всего, зрительной, слуховой и соматосенсорной), онтогенеза проекционных и ассоциативных областей коры больших полушарий. В этом чрезвычайно богатом спектре нейрофизиологических исследований особенно необходимо выделить чрезвычайно остроумные эксперименты, разработанные одним из учеников Н.Ю. Беленкова д.м.н. Виталием Ивановичем Щербаковым. На черепной коробке кошек крепились специально сконструированные В.И. Щербаковым металлические камеры, через которые прокачивался хладагент. Это позволяло, меняя температуру хладагента, дозированно и локально менять активность различных областей коры больших полушарий и в поведенческих экспериментах оценивать функциональное значение этих структур. Сегодня, когда нейрофизиология располагает такими методами, как фМРТ, ТМС, МЭГ и т. д., этот подход может показаться излишне оригинальным, но в 60-х годах прошлого века предложенный метод был, безусловно, революционным. К сожалению, вскоре после отъезда Н.Ю. Бе-

ленкова в Ленинград тогдашнее руководство ГМИ им. С.М. Кирова предприняло максимум усилий, чтобы эти исследования прекратились.

В целом, «эпоха Беленкова» в ГМИ была «золотым веком» нейрофизиологии в Горьком. По результатам исследований кафедры нормальной физиологии Никита Юрьевич опубликовал две монографии: «Условный рефлекс и подкорковые образования мозга» (1965) и «Принцип целостности в деятельности мозга» (1980). Методологической базой обеих книг (особенно второй) была теория функциональных систем П.К. Анохина, что многими нейрофизиологами того времени воспринималось, мягко говоря, неоднозначно.

После Н.Ю. Беленкова кафедру возглавлял (1973–1984) ученик М.А. Усиевича д.м.н. А.Б. Страхов, который постарался по возможности поддержать заложенные предшественником традиции. Наиболее заметные работы того периода были посвящены механизмам интегративной деятельности височной коры и регуляции целостного функционального состояния мозга.

С 1988 по 1994 годы кафедрой руководил ученик Н.Ю. Беленкова д.м.н. А.Т. Абакаров, который попытался возродить системный подход в исследованиях. Новыми направлениями работы кафедры были исследования механизмов нейропластичности и особенности функционирования вестибулярного аппарата (совместно с Институтом медико-биологических проблем Минздрава СССР).

Более четверти века кафедру нормальной физиологии ПИМУ возглавляет выпускница ГГУ – профессор, д.б.н. Ирина Васильевна Мухина (одновременно – директор Института фундаментальной медицины ПИМУ). Под ее руководством на кафедре развивается клеточная нейрофизиология. В частности, проводятся успешные исследования нейронной активности на нейроглиальной культуре клеток в норме и при экстремальных воздействиях.

Кроме того, целый ряд нейрофизиологических исследований кафедра проводит совместно с кафедрой нейротехнологий ННГУ, возглавляемой профессором, д.ф.-м.н. Виктором Борисовичем Казанцевым. Одним из ведущих направлений этой кафедры является когнитивное моделирование. На этой относительно молодой кафедре успешно работает целая группа столь же молодых, перспективных сотрудников, в частности, доктора физико-математических наук С.А. Лобов, С.Ю. Гордлеева, С.В. Стасенко, доктор биологических наук Е.В. Митрошина.

ГГПИ – Мининский университет

Наконец, еще один вектор развития нейрофизиологической школы П.К. Анохина направлен

в адрес Горьковского (далее – Нижегородского) государственного педагогического института. В определенной мере это явилось результатом недальновидной политики руководства ГМИ им. С.М. Кирова в 70-х годах прошлого века. Ряд известных в стране нейрофизиологов вынужден был покинуть медицинский институт; после некоторых промежуточных этапов они закрепились в педагогическом институте, на кафедре анатомии, физиологии и основ безопасности жизнедеятельности человека. Это в первую очередь ученики Н.Ю. Беленкова – профессора, доктора медицинских наук Валентин Александрович Сосенков и Виталий Иванович Щербаков, последовательно заведовавшие этой кафедрой. Наиболее существенный вклад в развитие нейрофизиологии внес В.И. Щербаков. Я уже упоминал его уникальный методический подход с локальным температурным выключением различных зон коры больших полушарий. В ГГПИ им. М. Горького у него по понятным причинам не было возможности проводить эксперименты на животных. Тогда исследования кафедры были сориентированы на изучение механизмов бинаурального слуха и цветового зрения. Под руководством В.И. Щербакова в начале 2000-х годов д.б.н. С.А. Полевой были разработаны компьютерные психофизические методы латерометрии и кампиметрии, позволившие объективно измерять параметры межполушарной слуховой асимметрии и цветоразличения. Методы были запатентованы. Впоследствии они вошли в батарею объективных тестов для цифровой оценки функционального состояния. В.И. Щербаков подготовил нескольких учеников, в числе которых д.б.н. М.К. Паренко и к.б.н. Н.Н. Шеромова. К сожалению, после кончины В.И. Щербакова к началу 2020-х годов кафедра утратила ресурсы и возможности для продолжения исследований.

Заключение: немного о главном

Нужно признать, что в начале 90-х годов прошлого века нейронаука в Нижнем Новгороде могла бы бесславно закончиться, если бы не великая женщина, создатель радиофака ГГУ, НИРФИ, ИПФ РАН и ИФМ РАН, профессор, д.ф.-м.н. Мария Тихоновна Грехова и «два Владимира» – д.ф.-м.н. Владимир Александрович Антонец и д.ф.-м.н. Владимир Григорьевич Яхно. Это не только разработка концепции искусственных сенсорных каналов (В.А. Антонец) и «адаптивная распознающая ячейка В.Г. Яхно». Это создание атмосферы поиска, нежданная помощь, а порой и предоставление невозможных возможностей. В 1990 году Мария Тихоновна предложила мне создать в Нижнем Новгороде Институт нейронаук РАН. Если бы я ее тогда послушал...

Анализ копинговых стратегий в классической парадигме активного избегания

М.Е. Пупикина*, Е.Ю. Ситникова

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва;

*mariapupikina@yandex.ru

Экспериментальная парадигма активного избегания, или условной реакции двустороннего избегания (УРДИ), используется для исследования нейрофизиологических механизмов поведения лабораторных крыс. Эта методика оценивает способность животного перемещаться из потенциально опасной зоны в безопасную при предъявлении условного сигнала. В случае задержки перемещения применяется негативное подкрепление в виде слабого электрического тока. Стратегия избегания является адаптивной реакцией на угрозу и относится к инструментальному обучению. УРДИ широко применяется для оценки когнитивных функций и поведенческой пластичности у грызунов.

Целью работы было выявить различия в стратегиях преодоления стресса (копинговых стратегий) между полами, используя анализ динамики выполнения теста УРДИ. Результаты показали, что самки продемонстрировали более высокую эффективность выполнения задачи по сравнению с самцами. У самцов чаще наблюдались пассивные копинговые стратегии, что могло быть связано с различиями в нейрохимических и гормональных механизмах регуляции поведения.

УРДИ – это классическая методика исследования процессов обучения и памяти у грызунов и человека [1, 2]. Для нас этот тест представлял уникальную парадигму для изучения механизмов копинга при остром стрессовом факторе, которого можно избежать. У лабораторных крыс этот тест обычно 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.

Избегание и страх тесно взаимосвязаны [3]. Помещая животное в новую среду, мы провоцируем активацию гипоталамо-гипофизарно-адренальной оси, что приводит к повышению уровня кортикостероидов и катехоламинов в системном кровотоке. Параллельно с этим инициируется исследовательская активность, которая может подавляться аверсивными стимулами, такими как открытое пространство, интенсивное освещение и другие стрессовые факторы. Данное событие, обусловленное новизной, порождает конфликт между исследовательским поведением и реакцией избегания. В ответ на стрессовые условия могут проявляться различные формы избегающего поведения, включая иммобилизацию (замирание, пригибание) и активные двигательные реакции (бег, прыжки) [3, 4]. Анализ динамики этого поведения

позволяет выделить стратегии, с помощью которых животное справляется со стрессом (копинговые стратегии).

Не существует единых критериев оценки выполнения УРДИ. Мы выделяем четыре типа поведенческих реакций при выполнении этого теста, которые характеризуют копинговые стратегии животных и позволяют оценить нейроповеденческие особенности каждого животного:

- Избегание – крыса переходит в «безопасный» отсек после предъявления условного стимула, избегая электрокожного раздражения (время реакции < 4,5 с). Это проактивная реакция.

- Избавление – перемещение в безопасный отсек во время электрической стимуляции и после прекращения подачи звукового сигнала. Это реактивный ответ.

- Не полностью выученное избегание, когда реакция отсрочена во времени и незначительно отличается от времени начала безусловного стимула.

- Пассивная реакция – крыса не переходит в «безопасный» отсек во время нанесения электрокожного раздражения, остается на месте, терпит раздражение. Если ситуация оценивается как неизбежная, крыса становится неподвижной после первых попыток избавления.

Метод условно-рефлекторного избегания

В рамках настоящего исследования был проведен однодневный сеанс тестирования условно-рефлекторной двигательной реакции избегания (УРДИ) в челночной камере, сконструированной из двух смежных отсеков размером 30 × 26 × 30 см. Пол обоих отсеков был выполнен из нержавеющей стали и представлен в виде прутьев диаметром 3 мм, по которым подавалось электрическое воздействие.

Работа была выполнена на 130 крысах WAG/Rij (возраст 7–8 месяцев; 52 самки и 78 самцов). Все самки подвергались тестированию в фазе диэструса эстрального цикла, что обеспечивало гормональную стабильность и исключало влияние половых гормонов на поведение.

Процедура включала 3-минутную адаптацию к экспериментальной среде непосредственно перед началом тестирования. В ходе эксперимента крысы обучались избегать негативного воздействия путем перехода в безопасный отсек. В качестве безусловного стимула использовали электрокожное раздражение с интенсивностью 0,5 мА, которое подавалось через 4,5 с после предъявления условного стимула (звукового сигнала с уровнем

громкости 70 дБ). Крысы обучались пересекать аркообразный проход, ведущий в соседний отсек для избегания воздействия (рис. 1). Временные интервалы между предъявлениями стимулов варьировались от 30 до 40 с, что минимизировало предсказуемость временных параметров. Электрическое воздействие подавалось исключительно в текущей локации крысы, обеспечивая четкую временную и пространственную корреляцию между условным и безусловным стимулами.

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.

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.

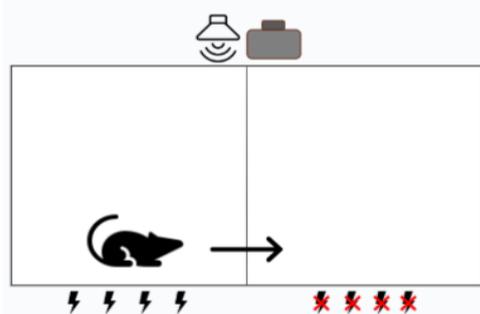


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с двумя отсеками, в которой крысы предъявляли условный стимул (звуковой сигнал в течение 4,5 с) и безусловный стимул (электрокожное раздражение лап, foot-shock)

Результаты

На основании анализа временных показателей реакции и кластеризации данных были выявлены три типа копинговых стратегий, используемых крысами (рис. 2).

Стратегия I (быстрое адаптивное поведение) характеризовалась преобладанием избегательных реакций, включая неполные формы избегания. Чаще наблюдалась у самок (58,8 %), чем у самцов (41,2 %).

Стратегия II (избегающее поведение) отличалась повышенным уровнем реакций избегания в ответ на безусловный стимул. Наблюдалась у особей обоего пола: 67,7 % самцов и 32,3 % самок.

Стратегия III (пассивное поведение) определялась отсутствием активных действий, нацеленных на избегание негативного стимула. Выявлена исключительно у самцов (100 %).

Большинство крыс использовали комбинацию вышеупомянутых стратегий.

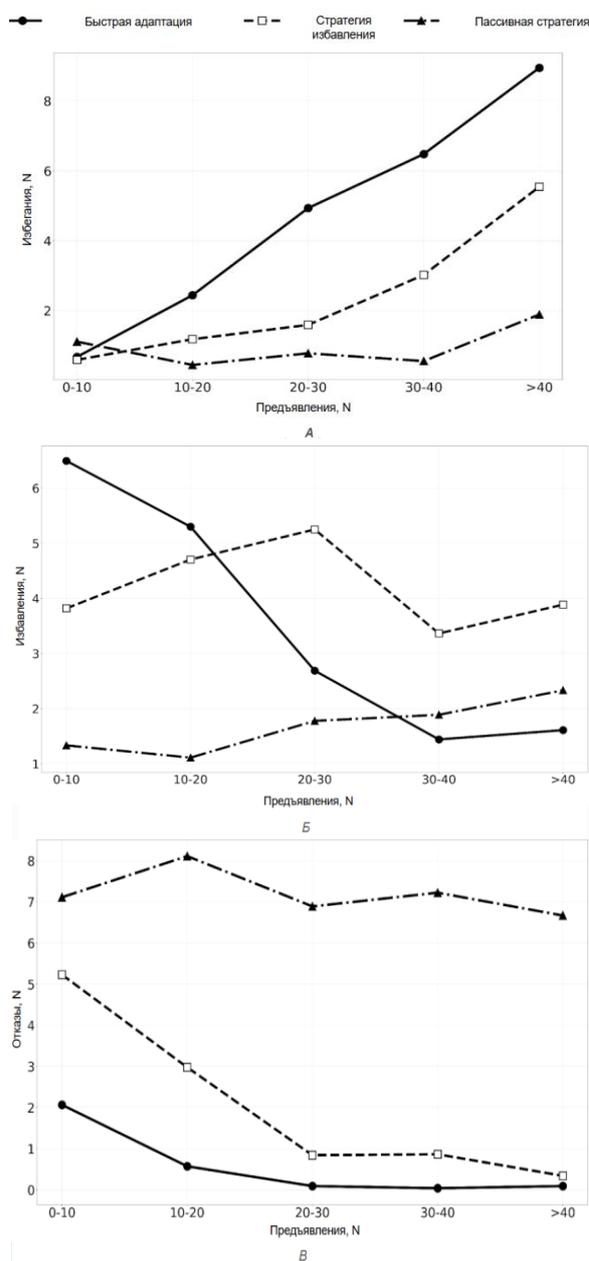


Рис. 2. Результаты кластерного анализа динамики выполнения теста УРДИ. Динамика избеганий (А), где показаны три типа копинговых стратегий. Крысы с быстрой адаптацией (сплошная линия) чаще остальных демонстрировали реакцию избегания. Динамика избавлений (Б), где крысы со стратегией избегания (пунктирная линия с квадратами) чаще остальных переходили в соседний безопасный отсек после предъявления условного и безусловного стимулов. Динамика отказов от выполнения теста (В), где крысы с пассивной стратегией (пунктирная линия с треугольниками) чаще остальных отказывались выполнять тест. На оси у представлено число избеганий (А), избавлений (Б), отказов (В) на оси x – номер попытки

На этапе формирования поведенческой стратегии (первые 10 предъявлений) исследовали корреляцию между числом реакций избегания и числом отказов с использованием корреляции Пирсона (рис. 3).

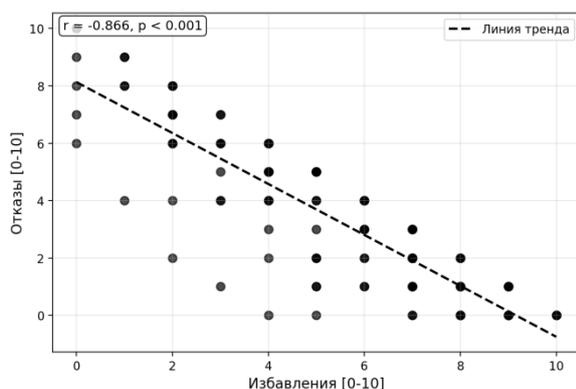


Рис. 3. Значимая отрицательная корреляция между показателями избавления и отказов в первые десять предъявлений стимулов

Коэффициент корреляции $r = -0,866$ указывает на наличие сильной отрицательной связи между стратегиями избегания и отказа на ранних этапах эксперимента. Эта связь свидетельствует о взаимоисключающем характере поведенческих стратегий: крысы демонстрируют либо тенденцию к физическому уходу из авersiveивой среды (активное избегание), либо отказ от выполнения задачи (пассивный отказ), исключая одновременное использование обеих стратегий. Это позволяет классифицировать крыс на две фенотипические группы: «активные избегатели», характеризующиеся выраженной мотивацией к физическому удалению от негативного стимула, и «пассивные отказники», демонстрирующие пассивное поведение и отсутствие активных попыток избегания. Данные результаты могут быть интерпретированы как проявление различных типов адаптивных реакций на стрессовые стимулы, что важно для понимания нейрофизиологических механизмов стресса и поведения.

Значения коэффициента Пирсона приблизилось к -1 , что указывает на высокую степень линейной обратной зависимости между переменными. Это свидетельствует о целенаправленном выборе стратегий поведения у крыс, обусловленном устойчивыми поведенческими предпочтениями.

Выводы

В ходе исследования было установлено, что самки крыс демонстрировали более эффективные копинговые стратегии в тесте активного избегания по сравнению с самцами. Они чаще использовали проактивные реакции, такие как избегание и не до

конца выученное избегание. Это свидетельствует о том, что самки более склонны к активным действиям для минимизации стрессовых ситуаций. Они могут быстрее адаптироваться к изменяющимся условиям и искать пути избегания негативных стимулов.

Самцы, напротив, чаще проявляли пассивные стратегии, такие как отказ от выполнения теста. Это указывает на их склонность к менее адаптивным реакциям на стресс. Пассивное поведение может быть связано с меньшей способностью к быстрому принятию решений в стрессовых ситуациях и с более высоким уровнем тревожности.

У самок быстрая адаптация к условиям теста не только свидетельствует об их более высокой способности к обучению, но и указывает на формирование ассоциативного страха на более высоком уровне. Это может быть связано с их устойчивостью к стрессу и способностью более эффективно справляться с вызовами окружающей среды.

Таким образом, данный тест можно использовать для отбора животных с различными фенотипическими особенностями, связанными с уязвимостью или устойчивостью к стрессу. Это может быть полезно в различных областях, таких как научные исследования, тестирование фармакологических препаратов и разработка методов коррекции поведения животных. Полученные данные могут способствовать более глубокому пониманию механизмов стресса и адаптации у животных, что, в свою очередь, может привести к разработке более эффективных стратегий управления стрессом в лабораторных условиях.

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. *De Kloet E.R., Molendijk M.L.* Coping with the forced swim stressor: towards understanding an adaptive mechanism // *Neural plasticity*. 2016. V. 2016, no. 1. P. 6503162.
4. *Molendijk M.L., de Kloet E.R.* Coping with the forced swim stressor: Current state-of-the-art // *Behavioural brain research*. 2019. V. 364. P. 1–10.

Роль исполнительного контроля в гетероиерархической организации системы когнитивных резервов

О.М. Разумникова

Новосибирский государственный технический университет;
razoum@mail.ru

Сдвиги функционального состояния в активности мозга обусловлены расширением возможностей взаимодействия исполнительных функций мозга и систем обработки информации, включая ее эмоциональную регуляцию. Их интеграция связана не только со сложностью задачи, но и с субъективным отношением к ней [1].

Когнитивная архитектура – это формализованные закономерности взаимосвязей компонентов мыслительной деятельности: внимания, памяти и принятия решений человеком, которые используются при создании программ искусственного интеллекта. Прогресс в разработке систем гибкой реконфигурации модулей, встроенных в когнитивную архитектуру, связан с выяснением нейрофизиологических механизмов интеграции или сегрегации нейронных сетей мозга в зависимости от сложности задач и необходимости переключения стратегий: от менее к более эффективным. Например, полученные нами результаты о частотно-пространственной «преднастройке» активности мозга указывают на реорганизацию фронтальных областей мозга и височных или теменных отделов коры в результате синхронизации низкочастотных дельта- или тета-ритмов с высокочастотными альфа-2 и бета-2 осцилляциями, отражающей разные стратегии решения креативных заданий [2, 3]. Исполнительные функции префронтальных областей коры необходимы для выбора той стратегии, которая не только соответствует условиям поставленных при тестировании креативности вербальных или образных задач, но и персонализированному вовлечению интеллектуальных способностей с критическим выбором оригинального решения проблемы при торможении иррелевантных идей.

Ценность когнитивных архитектур заключается в том, что их реализация обеспечивает высокую степень точности выполнения изучаемых задач при проектировании искусственного интеллекта. Адекватность соотношения психометрических показателей решения разных заданий и регионарной специфики активации соответствующих областей коры показана, например, сопоставлением нейронной архитектуры исполнительных функций и реализации ответной реакции или ее торможения [4]. В свою очередь использование модульной организации когнитивной архитектуры, например на основе разрабатываемой уже на протяжении более 20 лет модели АСТ-R6 [5–7], позволяет прогнозировать эффективности когнитивных функций и приводит к сокращению разрыва между механизмами деятельности символических и нейронных сетей.

АСТ-R6 включает сенсорные модули для обработки слуховой, зрительной и моторной информации, двигательные модули для организации действий, модуль для долгосрочных декларативных знаний и модуль целей, причем каждый модуль имеет свой буфер кратковременной памяти, как это показано на рис. 1. Эта модель была взята нами для разработки системы организации когнитивных резервов и модифицирована в соответствии с результатами, полученными в ходе комплексного исследования роли обучения и формирования исполнительных функций на разных этапах онтогенеза.

Значение обучения в формировании структуры интеллекта и исполнительных функций

Доказательства влияния образовательной деятельности и значения социально-культурных стереотипов мотивации эффективности обучения и выбора профессии были получены в серии исследований структуры интеллекта и связи его компонентов с креативностью на ранних стадиях онтогенеза: в период школьного и университетского образования [8–10]. При обучении новым знаниям или правилам решений задач, требующих гибкости и оригинальности мышления, модуль декларативных знаний пополняется в случае успешных результатов когнитивной деятельности и модифицируется вследствие ошибок. Схематично представленная на рис. 1 информационная среда имеет большее значение для поздних этапов онтогенеза, когда сохранение, а в некоторых случаях и обогащение информационных потоков стимулирует гибкость мышления, освоение новых форм деятельности, в том числе обучение применению информационных технологий погружения в виртуальную природную среду или мультизадачного когнитивного тренинга [11–13].

Образование на ранних этапах онтогенеза способствует развитию контролирующих функций поведения и гибкого планирования стратегий решения возникающих проблем (функции префронтальной коры) в соответствии с ресурсами памяти (гиппокамп и височная кора), что позволяет в дальнейшем обеспечить достаточно высокое качество жизни на поздних стадиях онтогенеза. Каждый из модулей – и планирование, и мотивация (рис. 1) – могут инициировать приобретение или реализацию когнитивных резервов с опорой на соответствующие функциональные нейронные сети префронтальной коры или лимбической системы.



Рис. 1. Архитектура когнитивных резервов, представленная на основе модулей ACT-R6

Гетероерархическая организация системы когнитивных резервов

Установленные в ходе нашего комплексного исследования закономерности возрастных изменений психометрических и нейрофизиологических показателей функций систем внимания, памяти, конвергентного и дивергентного мышления [2, 6–11] позволили представить оригинальную систему когнитивных резервов в виде гетероерархической организации, в которой и базовые когнитивные функции, и исполнительный контроль, и мотивация для поиска путей сохранения жизненной активности при старении могут выступать фактором стимуляции и/или реализации когнитивных резервов (рис. 2).

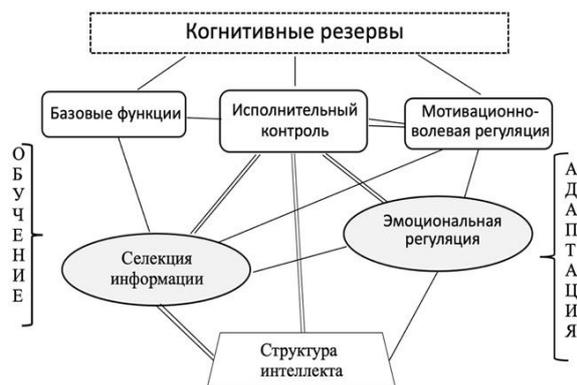


Рис. 2. Гетероерархическая организация системы когнитивных резервов

Базовые когнитивные функции, как врожденные индивидуальные особенности строения и функций мозга, развиваются в онтогенезе в результате воспитания и обучения и участвуют в формировании и исполнительного контроля, и мотивации (как интернально, так и экстернально заданной) разной деятельности. На более поздних этапах онтогенеза стимулирующая роль в продолжении усложнения системы когнитивных функций или

реализации когнитивных резервов переходит к исполнительному контролю поведения.

Механизмы реализации когнитивных резервов описываются комплексом возрастных изменений психометрических и психофизиологических показателей. Модуль базовых функций сформирован показателями скорости селекции информации и реализации моторной реакции ответа, рабочей и кратковременная зрительной и зрительно-пространственной памяти. Структура интеллекта включает такие компоненты, как флюидный интеллект, вербальный, образный, социальный и эмоциональный интеллект, а также эффективность дивергентного мышления, взаимосвязь которого с компонентами интеллекта подтверждена результатами серии наших комплексных исследований [8–11]. Процессы адаптации наиболее тесно связаны с характеристиками эмоциональной регуляции, индивидуальной системы мотиваторов и самооценки физического и психологического здоровья (рис. 2).

Полученные результаты свидетельствует, что ряд личностных характеристик, не только пол или возраст, но и эмоциональная устойчивость, и предпочитаемые стратегии мышления характеризуют разнообразие индивидуально представленной организации когнитивных функций, взаимосвязь которых схематично представлена линиями на рис. 2. Их интенсивность согласуется с мнением о доминирующей роли исполнительных функций в компенсаторных процессах для «позитивного» старения и в реализации возможностей современной информационной среды для стимуляции нейропластичности мозга на разных стадиях онтогенеза. В зависимости от генетического фактора и приобретенного опыта каждый из трех основных модулей когнитивных резервов может приобретать ведущую роль в эффективности обучения и поведенческой адаптации. Поэтому организация системы когнитивных резервов обозначена как гетероерархическая.

Разработанная модель когнитивных резервов отражает обнаруженную связь когнитивных функций и вовлечения соответствующих им структур мозга. Образование и социальная среда являются факторами формирования системы когнитивных резервов, реализация которых в позднем онтогенезе определяется развитием структур мозга и их функциональной связностью в раннем онтогенезе.

Механизмы реализации когнитивных резервов представлены разными формами взаимодействия исполнительного контроля селекции информации и ее эмоциональной регуляции, которые могут быть описаны комплексом психометрических и психофизиологических показателей, включая структуру интеллекта, скорость реакции и характеристики памяти и гибкости мышления. Причем лучшим показателем качества жизни вне зависимости от возраста соответствует преобладание позитивных эмоций над негативными при самооценке эмоционального интеллекта. Когнитивная тренировка способствует улучшению показателей тех когнитивных функций селекции информации и/или запоминания, на которые она направлена. Эффективность формирования и реализации когнитивных резервов в молодом возрасте достигается быстрее и требует применения высокой информационной нагрузки, тогда как в пожилом возрасте основными факторами успеха является устойчивый исполнительный контроль когнитивной деятельности [11, 13]. Разнообразие компонентов, их взаимодействия и доминирующей роли в гетероархической организации системы когнитивных резервов определяется не только возрастом или полом, но и профилем личностных свойств, включающих эмоциональную реактивность, мотиваторы поведения, предпочитаемые стратегии мышления и степень развития навыков исполнительного контроля поведения.

Литература

1. Shine J.M., Bissett P.G., Bell P.T. et al. The dynamics of functional brain networks: Integrated network states

during cognitive task performance // *Neuron*. 2016. V. 92, no. 2. P. 544–554.

2. Razumnikova O.M. Baseline measures of EEG power as correlates of the verbal and nonverbal components of creativity and intelligence // *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2022. V. 52, no. 1. P. 124–134.

3. Разумникова О.М. Фронтально-париетальные паттерны дельта- и бета-осцилляций как маркеры стратегий креативности // *Физиология человека*. 2023. Т. 49, № 3. С. 117–125.

4. Engelhardt L.E.K. et al. The neural architecture of executive functions is established by middle childhood // *Neuroimage*. 2019. V. 185. P. 479–489.

5. Anderson J.R., Lebiere C. *The Atomic Components of Thought*. Mahwah, NJ: Erlbaum. 1998.

6. Anderson M.C. Rethinking interference theory: executive control and the mechanisms of forgetting // *J. Mem. Lang.* 2003. V. 49. P. 415–445.

7. Разумникова О.М. Когнитивная архитектура познавательной деятельности при ее моделировании и психофизиологической оценке // *Успехи физиологических наук*. 2023. Т. 54, № 3. С. 90–104.

8. Разумникова О.М., Мезенцев Ю.А. Соотношение креативности, эмоционального и общего интеллекта в академической успеваемости студентов // *Вопросы психологии*. 2020. № 2. С. 119–128.

9. Разумникова О.М., Каган В.А. Соотношение креативности, интеллекта и успеваемости школьников 11–13 лет в зависимости от пола // *Вопросы психологии*. 2021. № 4. С. 135–144.

10. Разумникова О.М. Временная динамика показателей интеллекта в зависимости от пола и выбранной специальности // *Психология. Журнал Высшей школы экономики*. 2022. Т. 19, № 1. С. 8–25.

11. Разумникова О.М., Николаева Е.И. Тормозные функции мозга и возрастные особенности организации когнитивной деятельности // *Успехи физиологических наук*. 2019. Т. 50, № 1. С. 75–89.

12. Бакаев М.А., Разумникова О.М. Когнитивные резервы: префронтальная кора или информационная нагрузка? // *Успехи геронтологии*. 2021. Т. 34, № 2. С. 202–209.

13. Разумникова О.М., Матюшина М.А. Значение информационной нагрузки при тренировке зрительно-пространственной памяти в условиях распределенного внимания у пожилых женщин // *Успехи геронтологии*. 2022. Т. 35, № 1. С. 53–60.

Мультилингвистический тест Струпа как грубый детектор стратегий обучения

Д.В. Ронжин¹, К.И. Перочкин¹, Т.А. Швец^{1,2}, С.А. Полевая¹

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
danila.ronzhin@inbox.ru, s453383@mail.ru, stratrek@mail.ru

²АНО высшего образования «Университет НЕЙМАРК»;
shvets.unn@gmail.com

Распознавание визуальных объектов человеком, вне зависимости от теоретической парадигмы, представляет собой иерархический процесс, последовательно вовлекающий различные уровни нейронной обработки. На начальных этапах происходит выделение и анализ низкоуровневых (грубых) визуальных признаков, таких как базовые компоненты формы, цветовой тон, контраст, ориентация контуров и глубина. Эти признаки интегрируются, формируя промежуточные репрезентации. Впоследствии происходит сопоставление с хранящимися в долговременной памяти структурными описаниями объектов, что позволяет ассоциировать визуальный паттерн с идентификатором категории и извлечь связанные с ним семантические и контекстуальные (тонкие) признаки (DiCarlo J.J. et al., 2012).

Описанная биологическая модель иерархического восприятия легла в основу (Yamins D. et al., 2016; Hansen B.C. et al., 2025) архитектуры сверточных нейронных сетей (convolutional neural network, CNN), широко применяемых для распознавания образов в изображениях и видео. Ключевой принцип CNN – обучение иерархии фильтров (слоев), где

1) *ранние слои* извлекают грубые признаки (локальные градиенты, края, углы, текстуры базового уровня);

2) *глубокие слои*, интегрируя информацию предыдущих уровней, формируют репрезентации тонких признаков, отражающих сложные конфигурации, категориальную принадлежность объектов (классы) и их семантический контекст.

Хотя эффективное распознавание требует совместной работы всей иерархии, грубые признаки, как правило, формируются на более ранних стадиях обучения CNN и демонстрируют большую устойчивость и скорость извлечения.

Экстраполируя эту вычислительную метафору на биологические нейронные сети, можно предположить схожую закономерность при когнитивном освоении признаков: первичное восприятие и дифференциация опираются на грубые признаки, их комбинации формируют базовые объектные репрезентации, и лишь затем происходит эффективное кодирование и использование тонких, семантически насыщенных признаков для тонкого различения и категоризации.

Для эмпирической верификации этого предположения о приоритетности и независимости обработки грубых признаков в биологических

системах нами была разработана универсальная мультиязычная парадигма на основе модифицированного теста Струпа. Важно, что создание и реализация модифицированной версии теста осуществлялась на базе когнитивной платформы ArWay (Полевая С.А. и др., 2019).

Ключевая модификация заключается в использовании слов на шести международных языках (русский, английский, арабский, китайский, французский, испанский). Мы полагаем, что разработанный тест будет наиболее грубым признаком, поскольку к каждому языку жестко привязан один конкретный цвет (английский – фиолетовый, испанский – синий, китайский – зеленый, арабский – желтый, русский – красный, французский – коричневый). Мы считаем, что в ходе эксперимента у испытуемых формируется прямая связь между графическим шаблоном и цветом. Эта связь рассматривается как наиболее грубый перцептивно-ассоциативный признак, поскольку ее формирование требует минимальной семантической обработки самого слова.

Каждому испытуемому последовательно предъявлялась батарея из 7 вариантов тестов Струпа: 6 тестов на международных языках (русский, английский, арабский, китайский, французский, испанский), после прохождения которых испытуемые проходили мультиязычный вариант теста.

В каждом из тестов было четыре этапа.

1. *Mono*. Название цветов написано черными буквами. Задача выбрать цвет по смыслу слова.

2. *Color*. Вербальный и сенсорный образ слова идентичны (цвет букв слова соответствует смыслу слова).

3. *True text*. Вербальный и сенсорный образ слова не идентичны. Задача выбрать цвет в соответствии со смыслом слова.

4. *True color*. Вербальный и сенсорный образ слова не идентичны. Задача выбрать цвет в соответствии с цветом букв слова.

Все этапы разделяются на две категории: с когнитивным конфликтом и без него. Каждый этап включал в себя 30 стимулов.

Для апробации разработанного мультиязычного варианта было проведено пилотное кросс-культурное исследование. В нем приняли участие 25 условно здоровых испытуемых (18 мужчин и 7 женщин, средний возраст 23,3 года). Для обеспечения разнообразия языкового опыта и контроля потенциальных культурных эффектов выборка была сформирована из представителей различных

языковых групп: славянская ($n = 14$), тюркская ($n = 3$), романская ($n = 5$), австроазиатская ($n = 2$), индоарийская ($n = 1$). Все испытуемые владели родным и английским языком на уровне не ниже В2.

Статистическую обработку результатов проводили при помощи программ Microsoft Excel и Statistica 12 с использованием непараметрического критерия (U-критерий Манна – Уитни).

Установлено, что время выполнения мультиязычного теста Струпа достоверно меньше ($p < 0,05$) по параметру «время реакции» в субтестах *true text* и *color* в сравнении с тестами на международных языках. Когнитивный потенциал испытуемых в мультиязычном тесте Струпа выше, чем в других вариантах теста, что подтверждает сходство процессов обучения в естественных и искусственных нейронных сетях.

При дальнейшем анализе мультиязычного теста Струпа была выделена подгруппа испытуемых ($n = 5$ 20 % выборки) совершивших ошибки при выполнении субтеста *color*. Данная группа показала статистически достоверное большее время, проведенное в субтесте *mono* ($p < 0,05$). При этом в субтесте *true text* не было обнаружено значимых различий с группой испытуемых, не совершивших ошибок в субтесте *color*. Мы связываем такой результат с фиксированием стратегии обучения, посредством которой испытуемые, минуя инструкцию, пытаются обучиться самостоятельно. Ошибки во время выполнения субтеста *color* могут быть вызваны тем, что возникает конфликт между выстроенной ассоциативной сетью и необходимостью

переучиваться. Подобная стратегия фиксировалась исключительно при выполнении мультиязычного теста Струпа.

Вероятно, использование наиболее грубого детектора способно фиксировать стратегии обучения испытуемых посредством того, что графический шаблон (грубый признак) активируется раньше семантики из-за того, что к конкретному графическому шаблону привязан конкретный цвет. Ввиду этого 20 % выборки в субтесте *color* сложилась ситуация сложности подавления перцептивного шаблона при необходимости семантического анализа (сложность использования тонких признаков из-за фиксации на грубых).

Литература

1. Полевая С.А. Компьютерные технологии для скрининга, диагностики и цифрового отображения когнитивных нарушений / С.А. Полевая, Н.А. Буланов, С.Б. Парин // XXI международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2019»: Сборник научных трудов, Москва, 07–11 октября 2019 года. Часть 1. Москва: Московский физико-технический институт, 2019. С. 125–132.
2. DiCarlo J.J., Zoccolan D., Rust N.C. How does the brain solve visual object recognition? // Neuron. 2012. V. 73, no. 3. P. 415–434.
3. Hansen B.C., Greene M.R., Lewinsohn H.A.S. et al. Brain-guided convolutional neural networks reveal task-specific representations in scene processing // Scientific Reports. 2025. V. 15. P. 1–17.
4. Yamins D., DiCarlo J. Using goal-driven deep learning models to understand sensory cortex // Nat Neurosci. 2016. V. 19. P. 356–365.

Психофизиологические маркеры аутистических черт

Д.В. Ронжин, С.А. Полевая

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
danila.ronzhin@inbox.ru, s453383@mail.ru

Введение

Расстройство аутистического спектра (РАС) – это нарушения, которые можно охарактеризовать как стойкое снижение способности инициировать и поддерживать социальные взаимодействия и коммуникацию, а также ряд ограниченных и повторяющихся негибких паттернов поведения, интересов или занятий, которые явно нетипичны или избыточны для возраста и социокультурного контекста (МКБ-11, 2021). Современное понимание РАС базируется на спектральной модели (Sucksmith et al., 2011), предполагающей существование континуума выраженности симптомов. В рамках данного континуума выделяют как минимум два условных полюса (фенотипа): клинический фенотип (узкий фенотип аутизма), характеризующийся выраженностью симптомов, приводящей к клинически значимому нарушению функционирования и как следствие к постановке диагноза РАС, и субклинический фенотип (широкий фенотип аутизма, или аутистические черты).

Аутистические черты определяются как субклинические проявления нарушений в социально-коммуникативной сфере, характерных для РАС, но не достигающих порога диагностической значимости при постановке диагноза. Профиль нарушений при аутистических чертах может включать трудности в экспрессивной речи, в интерпретации метафор и сарказма, в установлении социальных контактов; склонность к фиксации внимания на деталях, ригидность в его переключении и сниженную способность к воображению.

В настоящее время в изучении как РАС, так и аутистических черт существует несколько блоков проблем: во-первых, отсутствуют психофизиологические маркеры диагностики (Loth et al., 2016); во-вторых, ограниченная надежность существующих диагностических инструментов (Adamou et al., 2021; Durlack et al., 2018; Mazefsky et al., 2013). При этом эпидемиологические данные свидетельствуют о статистически фиксируемом росте распространенности РАС (Maenner et al., 2023).

Учитывая обозначенные сложности, поиск потенциальных психофизиологических маркеров аутистических черт представляется обоснованным. Особенности движения глаз рассматриваются нами в качестве одного из перспективных кандидатов на роль таких маркеров.

Материалы и методы

В нашем исследовании мы сосредоточились на изучении влияния аутистических черт на эффективность распознавания эмоциональных со-

стояний по фотографиям лица. Для формирования выборки использовался опросник Autism-Spectrum Quotient (AQ), служащий инструментом скрининга выраженности аутистических черт в неклинической (общей) популяции. В качестве стимульного материала применялась модифицированная версия теста Reading the Mind in the Eyes Test (RMET), адаптированная для предъявления в эксперименте с применением айтрекера. Адаптация включала следующие этапы:

- 1) размещение оригинальных прямоугольных стимулов (изображения области глаз) по центру файла размером 1890 × 1417 пикселей;
- 2) релокация вариантов ответа в углы экрана;
- 3) наложение масок длительностью 4000 мс на варианты ответов для реализации возможности самостоятельного переключения стимулов испытуемым;
- 4) объединение оригинальных стимулов с несоциальным фоном (изображение леса);
- 5) стимулы были классифицированы по эмоциональной валентности (позитивная, нейтральная, негативная) на основании предлагаемых вариантов ответа.

Запись движения взора осуществлялась с использованием айтрекера SMI Hi-Speed 1250 (монокулярный режим записи – левый глаз, частота 1250 Гц, точность калибровки $\leq 0,6^\circ$). Для последующего анализа были заданы пять зон интереса (ЗИ): левый глаз, правый глаз, лоб, левая бровь, правая бровь. Анализовались следующие параметры взора:

- 1) время осмотра ЗИ (мс): суммарная длительность всех фиксаций и саккад в пределах ЗИ;
- 2) средний диаметр зрачка (пиксели);
- 3) средняя амплитуда саккад ($^\circ$);
- 4) количество фиксаций на ЗИ (ед.);
- 5) средняя длительность фиксаций на ЗИ (мс);
- 6) продолжительность взгляда на ЗИ (мс): сумма длительности саккады, приведшей к входу в ЗИ, и всех параметров взора внутри ЗИ.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием ПО Microsoft Excel, BeGaze 3.6 и Statistica 12. Применялись методы описательной статистики, коэффициент корреляции Пирсона для оценки связей и U-критерий Манна – Уитни для оценки межгрупповых различий.

Выборка исследования составила $N = 19$ (16 женщин, 3 мужчины), возрастной диапазон 18–37 лет ($M = 21,87$; $SD = 3,41$). На основании баллов по AQ были сформированы две группы: «Контрольная группа» ($n = 11$, низкие баллы AQ) и группа «Аутистические черты» («АЧ») ($n = 8$, повышенные баллы AQ).

Результаты

Результаты сравнительного анализа параметров движения взора между группами «Контроль» и «АЧ» для пяти ЗИ по шести параметрам выявили ряд значимых различий по эффективности распознавания эмоций, вегетативному компоненту движения взора, особенностям саккад и особенностям ландшафта внимания.

Наиболее значимое преимущество группы «АЧ» наблюдалось при восприятии нейтральных эмоций: в этой группе не зафиксировано ни одной ошибки (0 %), тогда как в группе «Контроль» уровень ошибок составил 20 %. При распознавании негативных эмоций группа «АЧ» также показала более высокую точность, допустив 42 % ошибок против 50 % в контрольной группе. В то же время, для стимулов позитивной валентности различия между группами отсутствовали – процент ошибок был одинаковым.

В группе «АЧ» зафиксирован достоверно меньший средний диаметр зрачка ($27,73 \pm 5,27$ пк) по сравнению с «Контрольной группой» ($31,51 \pm 5,89$ пк; $p < 0,05$), что может свидетельствовать о преобладании парасимпатической регуляции и, как следствие, большей включенности и сфокусированности на выполнении задачи.

Средняя амплитуда саккад в группе «АЧ» ($7,74 \pm 6,26^\circ$) была достоверно ниже ($p < 0,05$), чем в «Контрольной группе» ($8,81 \pm 7,27^\circ$), что потенциально указывает на необходимость более детального анализа визуальных признаков перед принятием решения об эмоциональном состоянии.

Время осмотра области глаз в группе «АЧ» (481 ± 63 мс) было достоверно короче ($p < 0,05$), чем в «Контрольной группе» (834 ± 69 мс). Средняя длительность фиксации на глазах в группе «АЧ» (507 ± 68 мс) была достоверно короче ($p < 0,05$), чем в «Контроле» (807 ± 70 мс). Среднее количество фиксаций на глазах в группе «АЧ» (2) было достоверно меньше ($p < 0,05$), чем в «Контроле» (3). Продолжительность взгляда на глаза в группе «АЧ» (607 ± 80 мс) была достоверно меньше ($p < 0,05$), чем в «Контроле» (976 ± 76 мс).

Также были получены следующие корреляционные связи: сильная обратная корреляция ($r = -0,71$) между общим баллом по опроснику AQ (чем он больше, тем больше выраженность

аутистических черт) и показателем среднего времени фиксации на ЗИ; сильная обратная корреляция ($r = -0,70$) между общим баллом по опроснику AQ и временем осмотра ЗИ.

Обсуждение

Полученные данные свидетельствуют о рассмотрении полученных нами особенностей движения взора и устоявшимся представлением о снижении способности к распознаванию эмоций при аутистических чертах. Эти результаты противоречат упрощенным представлениям о глобальном дефиците понимания эмоций при аутистических чертах и подчеркивают сложность и возможную компенсаторность когнитивных стратегий в данной выборке. Также полученные данные свидетельствуют о потенциале дальнейшего изучения особенностей движения взора в качестве перспективного маркера аутистических черт.

Литература

1. МКБ-11. Глава 06. Психические и поведенческие расстройства и нарушения нейропсихического развития. Статистическая классификация. М. : КДУ, Университетская книга, 2021. 432 с.
2. Adamou M., Jones S.L., Wetherill S. Predicting diagnostic outcome in adult autism spectrum disorder using the autism diagnostic observation schedule, second edition // BMC Psychiatry. 2021. V. 21. 8 p.
3. Dorlack T.P., Myers O.B., Kodituwakku P.W. A comparative analysis of the ADOS-G and ADOS-2 algorithms: preliminary findings // J. Autism Dev. Disord. 2018. V. 48, no. 6. P. 2078–2089.
4. Loth E., Spooren W., Ham L. et al. Identification and validation of biomarkers for autism spectrum disorders // Nature Rev. Drug Discov. 2016. V. 15, no. 1. P. 70–73.
5. Maenner M.J., Warren Z., Williams A.R. et al. Prevalence and Characteristics of Autism Spectrum Disorder Among Children Aged 8 Years – Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network, 11 Sites, United States, 2020. MMWR Surveill Summ 2023. V. 72. P. 1–14.
6. Mazefsky C.A., McPartland J.C., Gastgeb H.Z. et al. Brief report: comparability of DSM-IV and DSM-5 ASD research samples // J. Autism Dev. Disord. 2013. V. 43, no. 2. P. 1236–1242.
7. Sucksmith E., Roth I., Hoekstra R.A. Autistic traits below the clinical threshold: re-examining the broader autism phenotype in the 21-st century // Neuropsychol. Rev. 2011. V. 21, no. 4. P. 360–389.

«Когнитивный таламус» человека и грызунов

Е.Ю. Ситникова

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва;
eu.sitnikova@ihna.ru

Таламус, эволюционно древняя структура, играющая ключевую роль в интеграции сенсорных сигналов, модуляции сознания и регуляции цикла сон-бодрствование. В последние годы особое внимание уделяется его когнитивным функциям и их нарушениям при патологических состояниях, таких как неврологические и психиатрические заболевания [1–4]. В настоящей статье рассматривается концепция «когнитивного таламуса» [5–7], а также его особенности у человека и крысы, последняя часто является экспериментальной моделью в нейробиологических исследованиях.

Таламус представляет собой парное образование, расположенное в диэнцефалоне головного мозга. Он состоит из множества иерархически связанных ядер, которые вовлечены в следующие основные функции:

- * обработка сенсорной информации;
- * регуляция сознания, бодрствования и сна;
- * контроль вегетативных функций (например, температуры тела, аппетита, сна и бодрствования);
- * участие в формировании эмоций.

Когнитивная функция таламуса, или «когнитивный таламус», обеспечивается ядрами, которые, помимо базовых сенсорно-моторных функций, играют главную роль в высших когнитивных процессах. Информация об основных ядрах «когнитивного таламуса» человека представлена в таблице 1.

Когнитивный таламус человека

У человека таламус имеет более сложное строение, чем у других млекопитающих. Это связано с развитием высших психических функций, таких как речь, мышление, сознание и т. д. У человека более развиты ассоциативные ядра таламуса, которые участвуют в обработке сложной информации и формировании сложных поведенческих реакций.

Кроме того, у человека более развита система связей между таламусом и другими структурами головного мозга, такими как кора больших полушарий, лимбическая система и др. Это позволяет более эффективно обрабатывать информацию и координировать различные функции организма.

1. Исполнительные функции и принятие решений. Ключевое ядро – дорсомедиальное ядро (*dorsomedial nucleus, DMN*). Оно связано с префронтальной корой (*ПФК*) и регулирует рабочую память, планирование, целенаправленное поведение и контроль импульсов. *DMN* интегрирует эмоциональные (лимбические) и рациональные (кортикальные) сигналы для принятия сложных решений. Повреждение *DMN* (например, при ин-

сультате) может привести к исполнительным дисфункциям, апатии или необдуманным решениям.

2. Контроль внимания. Ключевой центр – пулвинар (*Pulvinar*), куда поступает информация от органов чувств разной модальности (зрительная, слуховая, соматосенсорная). Пулвинар анализирует и ранжирует стимулы, фокусируя когнитивные способности на наиболее важных внешних раздражителях. Он координирует пространственное внимание и подавляет отвлекающие факторы. Дисфункция пулвинара связана с синдромом игнорирования (неспособностью обращать внимание на одну сторону пространства) и синдромом дефицита внимания (*СДВГ*).

3. Формирование и консолидация памяти. Ключевые ядра – передние ядра (*anterior nuclei, AN*) и медиально-дорсальное ядро (*mediodorsal nucleus, MDN*). Передние ядра тесно взаимодействуют с гиппокампом и поясной корой, обеспечивая функционирование эпизодической памяти и пространственной навигации. Медиально-дорсальное ядро является критическим узлом для преобразования кратковременных воспоминаний в долговременную память через механизмы консолидации. Дисфункция этой системы приводит к серьезным проблемам с памятью, включая тяжелую потерю памяти на события после начала болезни (антероградная амнезия) или создание ложных воспоминаний. Это подчеркивает важность таламуса для когнитивных процессов.

4. Сенсорная интеграция и мультисенсорная обработка. Ключевой центр – пулвинар (см. выше), который объединяет сенсорные сигналы разных модальностей и формирует комплексный перцептивный опыт. Дисфункция пулвинара может способствовать сенсорной перегрузке при аутизме или галлюцинациям при шизофрении.

5. Регуляция сознания и возбуждения. Ключевые ядра – интраламнарные ядра (*intralaminar nuclei, ILN*) и ретикулярное ядро (*reticular thalamic nucleus, RTN*). Ретикулярное ядро – важнейшее звено таламо-кортикальной системы, вовлеченной в контроль состояния бодрствования и сна. Интраламнарные ядра поддерживают возбуждение коры головного мозга в состоянии бодрствования. Повреждение этих структур может вызвать кому или расстройство сознания.

6. Регуляция эмоций. Ключевой нейрон – медиально-дорсальное ядро (*MDN*) и связи с лимбической системой, включая миндалевидное тело (*amygdala*), страх/эмоции и префронтальную кору, модулируя эмоциональные реакции. Дисфункция этой части может приводить к расстройствам настроения, депрессии, усилению тревожности и импульсивному поведению.

Таблица 1

Ядра «когнитивного таламуса» у человека

Ядро	Ключевые функции	Ключевые связи	Когнитивная роль
<i>Dorso-medial (DM)</i>	Исполнительные функции, рабочая память	Префронтальная кора, лимбическая система	Принятие решений, планирование, эмоциональная регуляция; нарушены при шизофрении, СДВГ
<i>Pulvinar</i>	Внимание, мультисенсорная интеграция	Теменная, височная, зрительная кора	Зрительное внимание, выделение значимого; нарушено при синдромах игнорирования, аутизме
<i>Anterior (AN)</i>	Эпизодическая память, навигация в пространстве	Гиппокамп, поясная кора, мамиллярные тела	Консолидация памяти; нарушено при синдроме Корсакова
<i>Medio-dorsal (MD)</i>	Формирование эмоций, память	Миндалевидное тело, орбитофронтальная кора	Реакции страха и обучение на основе вознаграждения; нарушено при депрессии
<i>Intralaminar (ILN)</i>	Пробуждение, сознание	Неокортекс, базальные ганглии	Устойчивое внимание; нарушения приводят к коме и вегетативному состоянию
<i>Reticular (RTN)</i>	Сенсорная фильтрация, внимание, ритмы сна	Таламокортикальные нейроны, кора головного мозга	Селективное подавление нерелевантной сенсорной информации; дисфункция при эпилепсии (абсанс), шизофрении

Сравнительный анализ анатомии и функциональных характеристик таламуса у человека и грызунов выявляет значительные различия, обусловленные экологическими и поведенческими адаптациями. У человека таламус демонстрирует более сложную организацию ядер, что коррелирует с высокоразвитыми когнитивными функциями, включая сложные социальные взаимодействия и абстрактное мышление. Повышенная плотность таламических связей с префронтальной корой способствует развитию исполнительных функций и когнитивного контроля.

У грызунов, адаптированных к условиям, требующим высокой сенсорной чувствительности и быстрой реакции, наблюдается более развитая таламическая система обработки сенсорной информации. Это проявляется в увеличенной плотности таламических проекций на соматосенсорную кору и гипоталамус, обеспечивая эффектив-

ную интеграцию сенсорных данных и регуляцию поведенческих реакций.

Функциональные гомологии структур когнитивного таламуса у человека и грызунов

Пулвинар играет ключевую роль в процессах зрительного внимания и обработки зрительной информации у человека, но отсутствует у грызунов.

Ядра дорсомедиального (*DM*) и медиального дорсального (*MD*) таламуса играют ключевую роль в обеспечении высших когнитивных функций, включая абстрактное мышление и рабочую память у человека. Ядро *MD* у грызунов представляет собой структурный и функциональный аналог этих ядер у человека, но характеризуется более простыми связями с префронтальной корой.

Передние ядра (*AN*) у человека функционально гомологичны антеро-медиальному ядру (*AM*) у грызунов. Эти ядра участвуют в поддержании гиппокамп-зависимой памяти, а также играют ключевую роль в процессах пространственной ориентации и навигации.

Интраламнарные ядра (*ILN*) человека соответствуют паравентрикулярному ядру (*PVT*) у грызунов. Эти структуры вовлечены в регуляцию аверзивных реакций, модуляцию реакций на стресс и формирование аддикций.

Ядро *RTN* у человека аналогично ядру с таким же названием у грызунов и критически важно для сенсорного контроля и обработки сенсорной информации.

Когнитивный таламус грызунов

Грызуны, в том числе крысы, имеют относительно простой таламус по сравнению с человеком. У них менее развиты ассоциативные ядра и система связей между таламусом и корой больших полушарий. Это связано с тем, что крысы не обладают такими сложными психическими функциями, как человек.

Когнитивный таламус у крыс содержит ядра, которые интегрируют и передают информацию, необходимую для обучения, памяти, внимания, принятия решений и обработки эмоций (таблица 2). Взаимодействие между таламическими ядрами (паравентрикулярными, ретикулярными, ядрами *Re/Rh*, медиодорсальным) и префронтальной корой обеспечивает обработку информации и поддержание рабочей памяти, что является ключевым аспектом когнитивной деятельности крыс. Ниже перечислены основные когнитивные механизмы у крыс.

1. Префронтально-гиппокампальный диалог посредством ядер *Reuniens (Re)* и *Rhomboid (Rh)* обеспечивает интеграцию пространственной и временной информации, которая необходима для принятия решений. Взаимодействие ядер *Re* и *Rh* с гиппокампом и префронтальной корой необходимо для формирования целенаправленного поведения.

2. Эмоциональная значимость вознаграждения. Паравентрикулярное ядро (*PVT*) вовлечено в анализ уровня стресса и получения вознаграждения. Активация пути *PVT* → прилежащее ядро способствует высвобождению дофамина при предвкушении вознаграждения. Повешение активности *PVT* ассоциировано с тревожным поведением в тестах с использованием приподнятого крестообразного лабиринта.

Таблица 2

Ядра «когнитивного таламуса» у крыс

Ядро	Ключевые функции	Ключевые связи	Когнитивная роль
<i>Mediodorsal (MD)</i>	Исполнительные функции, рабочая память	Префронтальная кора (медиа́льная, mPFC)	Принятие решений, пространственная рабочая память, реакция страха, модели шизофрении
<i>Antero-medial (AM)</i>	Пространственная память, навигация	Гиппокамп, ретроспленальная кора	Контекстное обучение, критически важно для навигации в лабиринте Морриса
<i>Paraventricular (PVT)</i>	Стресс, получение награды	Гипоталамус, прилежащее ядро	Аверсивное (вызывающее страх) обучение, формирование зависимостей; модуляция реакции на стресс
<i>Reuniens/Rhomboid (Re/Rh)</i>	Интеграция гиппокампа и префронтальной коры	Гиппокамп, префронтальная кора	Консолидация памяти, кодирования временной последовательности событий; нарушения в моделях посттравматического стрессового расстройства
<i>Ventromedial (VM)</i>	Лимбико-кортикальная ретрансляционная система	Базальная латеральная миндалина, префронтальная кора	Формирование и хранение эмоциональной памяти, тревожности (тест – приподнятый крестообразный лабиринт)
<i>Reticular (RTN)</i>	Сенсорная фильтрация, внимание, ритмы сна	Таламокортикальные нейроны, кора головного мозга	Генерация сонных веретен, фильтрация сенсорной информации; нарушения в моделях расстройств аутистического спектра

3. Настройка внимания. Тормозные нейроны *RTN* формируют ГАМК-ергические проекции на таламокортикальных нейронах релейных (переключателных) ядрах. Вытормаживают поток незначимой информации, способствуя настройке внимания на значимые стимулы. Повреждение

RTN приводит к ухудшению устойчивого внимания в задачах на последовательное реагирование.

4. Рабочая память задействует медиодорсальное ядро (*MD*) и медиальную префронтальную кору (*mPFC*). Функциональная связь *MD* → *mPFC* обеспечивает поддержание рабочей памяти, включая обработку пространственной и объектной информации в режиме реального времени.

Заключение

Когнитивный таламус играет важную роль в координации «симфонии мозга более высокого порядка», обеспечивая бесперебойную интеграцию восприятия, памяти, внимания и поведения. В таблице 3 представлены основные различия в нейрофизиологических механизмах когнитивных процессов между человеческим таламусом и таламусом крысы.

Таблица 3

Процессы в «когнитивном таламусе» у человека и крыс

Когнитивный процесс	Таламус человека	Таламус крысы
Рабочая память	MD → префронтальная кора (дорсолатеральная)	MD → медиа́льная префронтальная кора (mPFC)
Внимание	Пулвинар → теменная кора	LP/LD → зрительная/ретроспленальная кора
Эпизодическая память	Петля ATN → гиппокамп-цигулярная кора	Петля AM → гиппокамп-ретроспленальная
Эмоциональная память	MD → Миндалевидное тело-орбитофронтальная кора	MD/PVT → Миндалевидное тело-прилежащее ядро

Литература

1. *Moustafa A.A. et al.* The thalamus as a relay station and gatekeeper: Relevance to brain disorders // *Rev. Neurosci.* Walter de Gruyter GmbH. 2017. V. 28, no. 2. P. 203–218.
2. *Wolff M., Vann S.D.* The Cognitive thalamus as a gateway to mental representations // *J. Neurosci.* 2019. V. 39, no. 1. P. 3–14.
3. *Avoli M.* A brief history on the oscillating roles of thalamus and cortex in absence seizures // *Epilepsia.* John Wiley & Sons, Ltd, 2012. V. 53, no. 5. P. 779–789.
4. *Hwang K. et al.* The human thalamus is an integrative hub for functional brain networks // *J. Neurosci.* 2017. V. 37, no. 23. P. 5594–5607.
5. *Saalmann Y.B., Kastner S.* The cognitive thalamus // *Frontiers in Systems Neuroscience.* 2015. V. 9, no. MAR.
6. *Cassel J.C., de Vasconcelos A.P.* The cognitive thalamus: A bridal chamber not to forget // *Neuroscience and Biobehavioral Reviews.* 2015. V. 54.
7. *Cassel J.C., de Vasconcelos A.P.* The thalamus: A long journey through successive translations (Editorial to the special issue entitled ‘The Cognitive Thalamus’) // *Neuroscience and Biobehavioral Reviews.* 2022. V. 140.

Планирование поведения робота с элементами креативности

Л.А. Станкевич, А.М. Корсаков, А.А. Демчева

Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург;
Stankevich_lev@inbox.ru

Введение

В настоящее время во всем мире большое внимание уделяется развитию интеллектуальной робототехники. Такая робототехника в начальный период 1970–1990 годов использовала системы управления на традиционных методах слабого искусственного интеллекта (ИИ). Эти системы управления обеспечивали роботам решение относительно простых задач, разгружая людей от рутинной работы. В период 1990–2010 годов в системах интеллектуального управления роботом стали применяться методы когнитивного ИИ, что значительно увеличило интеллектуальные способности роботов. Были предприняты попытки создания когнитивных роботов, в частности, гуманоидного класса с управлением на базе искусственных когнитивных систем. Фактически такие системы в определенной степени моделируют мышление, поскольку в них используются модели познания и когнитивные функции прогнозирования, планирования и пр., что обеспечивает им способность к обучению и самообучению в процессе работы, а также к ментальному принятию решений. Началось осмысление возможностей моделирования креативности, что дало толчок к развитию направления в ИИ, названного искусственным разумом [1]. Однако в это время для реализации искусственного разума роботов еще не были созданы достаточно эффективные средства. Начиная с 2013–2015 годов началось формирование так называемого сильного (или общего) ИИ (AGI – Artificial General Intelligence) на основе нейронных сетей с глубоким обучением [2]. Появление в 2018 году больших языковых моделей на трансформерах [3] открыло новые возможности для моделирования человеческого интеллекта, что приблизило создание искусственного разума роботов [4], или искусственной психики [5].

Предполагается, что роботы с искусственным разумом (разумные роботы) смогут полностью заменять человека во многих областях и контактировать с ним на равных. В работе [6] описан подход к созданию разумных гуманоидных роботов. Схема искусственного разума робота, предлагаемого в этой работе, представлена на рис. 1.

Система включает три информационных канала, реализующих интеллектуальные, когнитивные и креативные функции. В этих каналах обрабатывается информация, накапливаемая в модулях вербальной и образной моделей мира (окружения), поступающей из модулей, реализующих сенсорные функции. Результаты работы модулей интеллектуальных, когнитивных и креативных функций используются модулем, реализующим моторные функции, необходимые для координированного

управления эффекторами робота. Существует также прямой сенсомоторный канал обработки входящей информации и управления роботом через эффекторы. Интеллектуальные функции реализуются логическими средствами обработки вербальной информации. Эти функции достаточно отработаны и уже сейчас успешно реализуются в системах управления роботами. Когнитивные функции предполагается реализовать нейробиологическими средствами обработки вербально-образной информации. Работы в этой области успешно развиваются и уже дают положительные результаты. Креативные функции требуют обработки образной информации. Реализация этих функций предполагается с использованием специальных нейроморфных средств. Все каналы действуют согласованно, периодически передавая друг другу результаты в ходе решения своих задач. Каждый канал имеет несколько уровней последовательно-параллельной ассоциативной обработки вербальной или образной информации с использованием вербальной или образной моделей мира.



Рис. 1. Схема искусственного разума робота

Если моделирование когнитивных функций в системах роботов в определенной степени уже освоено, то моделирование креативных функций пока является мало исследованной областью. Однако в последнее время имеет место тенденция к росту числа исследований в области креативного ИИ и креативной робототехники.

В современных системах интеллектуального управления роботами используются средства сильного ИИ, что позволяет моделировать неко-

торые когнитивные функции. С использованием средств сильного ИИ также проводятся исследования по моделированию креативных функций в системах роботов. Примерами являются роботы серии RT (*Robotic transformer*), в которых верхние когнитивные уровни управления реализованы на БЛМ. Они продемонстрировали человекоподобное поведение в домашней среде с элементами креативности [7, 8].

Самостоятельное развитие получила креативная робототехника [9]. В рамках этого направления проведен ряд разработок и исследований того, как роботы могут проявлять креативность, создавая новые артефакты из области искусства при взаимодействии с человеком.

Наряду с задачами по созданию новых артефактов от искусства, определены несколько общих задач, решаемых креативной робототехникой: 1) формирование гипотез путем обобщения на основе индуктивного вывода; 2) определение функциональных зависимостей по наборам получаемых данных с использованием вероятностных методов, нечетких множеств и нейронных сетей; 3) автоматическое получение знаний в логических формах продукции, семантических или фреймовых сетей; 4) автоматическое конструирование новых объектов с использованием эволюционных алгоритмов [6].

Основная цель данной работы – показать, что современные роботы могут стать более разумными, если они будут обладать не только когнитивными, но и креативными способностями. Далее рассматриваются существующие подходы к моделированию креативности в ИИ и робототехнике. Показывается, что в робототехнике существуют задачи, которые можно эффективно решать с использованием креативного подхода. Описаны проведенные эксперименты по решению задач навигационного поведения роботов, с использованием элементов креативности. В заключении сделаны выводы по результатам анализа проблемы креативности и проведенных исследований.

Моделирование креативности в ИИ

Начиная с 1990-х годов исследуются подходы к моделированию креативности в ИИ [10, 11]. Было создано множество программ и устройств, способных рисовать, писать стихи, сочинять музыкальные произведения, создавать новые артефакты. В теоретическом плане было введено понятие «концептуальное пространство», определяющее принятый стиль мышления в некоей предметной области, а также набор разрешающих ограничений, которые позволяют осуществить генерирование структур, лежащих внутри этого пространства. При изменении таких ограничений пространство трансформируется, и становятся возможными идеи, которые были немислимыми в исходном концептуальном пространстве. Исходя из рода операций, осуществляемых в концептуальном пространстве, были выделены три типа креативности: комбинаторная, исследовательская и трансформационная.

Комбинаторная креативность заключается в порождении новой идеи через необычную комбинацию известных идей. Ее примерами являются поэтические образы, метафоры, аналогии.

Исследовательская креативность предполагает продвижение по концептуальному пространству в соответствии с его структурой и ограничениями с целью обнаружения новых его участков. Научные открытия, литературное и музыкальное творчество, визуальные искусства представляют собой сферы приложения соответствующих моделей исследовательской креативности. Для обнаружения нового содержания в рамках модели должно быть определено концептуальное пространство и обеспечены способы продвижения по нему.

Трансформационная креативность включает изменение одного или нескольких относительно фундаментальных измерений, определяющих концептуальное пространство таким образом, что становится возможным порождение идей, немислимых ранее. В отличие от исследовательской креативности, где имеет место простое следование принятым направлениям мышления в данной области с минимальными изменениями концептуального пространства, здесь требуется применять более глубокие изменения. Такой тип креативности соотносится с творчеством в полном смысле слова, подчеркивая его наиболее сложную природу и наивысшую ценность.

По оценке специалистов, с большим успехом сейчас осуществляется моделирование исследовательской креативности, несмотря на то что оно требует серьезных усилий для определения концептуального пространства и процедур исследования его потенциала.

Комбинаторная и трансформационная креативность оказываются более неуловимыми сущностями для моделирования. Причина этому видится в трудностях моделирования богатства ассоциативной памяти человека, а также в определении ценностей и возможности выражения их в вычислительной форме. Для моделирования комбинаторной креативности перспективно использование нейросетевых моделей, которые могут восстанавливать и распознавать знакомые паттерны активности в присутствии шума.

При моделировании трансформационной креативности обычно используются программы, основанные на генетических алгоритмах и способные изменять свои эвристики, а также оценивать результаты своих решений. Такими программами являются AM (*The Automated Mathematician*) и EURISCO. Они используют эвристики для «порождения» новых математических концептов из набора простых математических концептов и даже метаэвристики для порождения своих собственных эвристик. В области графического искусства также используются программы с генетическими алгоритмами, которые генерируют бесконечное количество цветных образов, не похожих на предыдущие.

В общем, при моделировании креативности в ИИ используются когнитивные механизмы решения проблем путем концептуализации, ассоциаций, аналогий, индуктивного обобщения, концептуального комбинирования, визуализации.

Современные подходы к моделированию креативности базируются на применении больших языковых моделей, что существенно повысило эффективность такого моделирования [12].

Креативность в робототехнике

На начальном этапе развития креативной робототехники были проведены исследования в области взаимодействия человека и робота при создании новых артефактов от искусства [9]. В последнее время проводятся также исследования по креативности автономных интеллектуальных роботов [6]. Выделены общие задачи, которые связаны с креативной робототехникой.

Формирование гипотез путем обобщения основано на индуктивном логическом выводе (обобщении исходных примеров). Недостатком индуктивного вывода в плане его реализации является плохая автоматизируемость. Применяемые в настоящее время автоматические процедуры индуктивного вывода либо сильно ограничены, либо предназначены для узко очерченных креативных задач.

Определение функциональных зависимостей по наборам получаемых данных основано на вероятностных методах, нечетких множествах и нейронных сетях. Генерация зависимостей по наборам получаемых данных реализуется: путем ассоциаций, т. е. выделения ассоциативных связей данных в результате обобщения связей между данными, а также методом регрессии и классификации.

Получение знаний в логических формах является основой для создания самообучающихся систем. Прототипами таких систем являются: продукционные системы с автоматическим формированием правил; семантические сети с автоматическим формированием понятий и отношений; фреймовые системы с самообучением. Методы обучения в таких системах – это метаправила, параметрическое обучение, генетические и эволюционные алгоритмы. Они имитируют креативные функции человека по генерированию неизвестных понятий и правил.

Создание аналитических моделей, которые лежат в основе физических явлений, необходимо для автоматического исследования среды. Генерация моделей явлений производится на основе обработки данных о них. Используются методы, основанные на эволюционных алгоритмах. Один из подходов в этом направлении основан на методе символьной регрессии.

Для креативной робототехники можно сформулировать также некоторые специфические задачи, связанные с поиском новых решений. Далее кратко обозначены некоторые специфические креативные задачи, связанные с поведением роботов.

Определение новых целей и создание новых моделей поведения. Эта задача важна, если робот попадает в неизвестную среду, но имеет определенное задание, которое требует постановки новых локальных целей и новых моделей поведения для реализации задания.

Исследование незнакомой среды и построение ее когнитивной модели. Эта задача связана с маркированием среды и локализацией робота в системе маркеров.

Поиск скрытого объекта. Нужно найти невидимый объект, который периодически выдает сигналы, сила которых зависит от расстояния между роботом и объектом роботом. Среда имеет много препятствий, затрудняющих поиск.

Эксперимент по креативному планированию и управлению движением робота. Креативная способность нужна роботу для решения задачи планирования маршрута к скрытому объекту в среде, неизвестной роботу. Абстрактным примером такой среды может быть лабиринт (рис. 2, 3). Целью является скрытый объект, который подает роботу сигнал близости. Маршрут движения робота в лабиринте к скрытому объекту заранее не известен. Будем считать, что робот двигается шагами и предварительно обучен локальным действиям: выходам из глухих тупиков (красная рамка) и прохождению тупиков с выходами налево или направо (коричневая рамка) развилок (зеленая рамка). Он также может итерационно строить карту пройденного маршрута, в которой фиксируются тупики и развилки, а также число шагов, пройденных между ними. Такая карта необходима роботу для возвращения в исходную позицию.

Решение такой задачи соответствует исследовательской модели креативности – маршрут заранее неизвестен и синтезируется в процессе поиска пути с учетом сигнала близости к скрытому объекту и пошагового движения робота, наученного локальным действиям.

При креативном процессе синтеза маршрута система навигации робота работает с образами. Так, при пошаговом движении к скрытому объекту в лабиринте робот должен распознавать перцептивные образы текущих ситуаций (глухие тупики, тупики с выходами направо или налево, развилки) путем сопоставления с образами, сохраненными в памяти при обучении. Каждый перцептивный образ генерирует образ действия в соответствии со следующими правилами:

глухой тупик → назад до развилки,

тупик с выходом → направо или налево со случайным выбором,

развилка → прямо, направо или налево со случайным выбором.

На каждом шаге делается проверка на приближение к цели по сигналам близости к ней: если сигнал усилился, можно продолжать сделанное движение, если сигнал ослабел – вернуться на предыдущий шаг. В некоторых случаях возможно заикливание маршрута движения по лабиринту, т. е. попадание в позицию в лабиринте, в которой

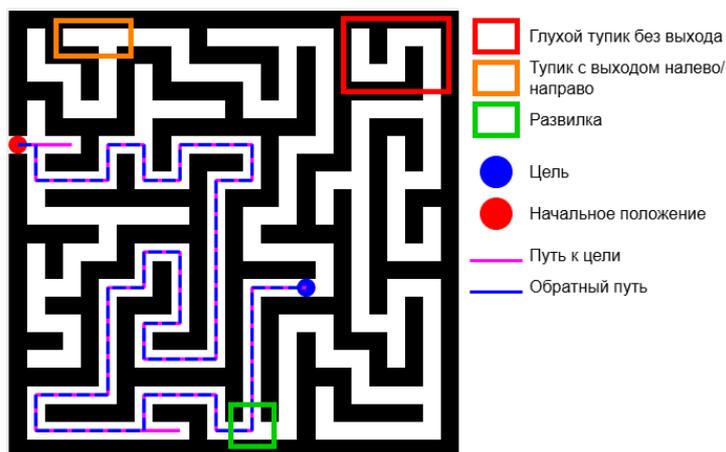


Рис. 2. Нахождение пути в лабиринте 1

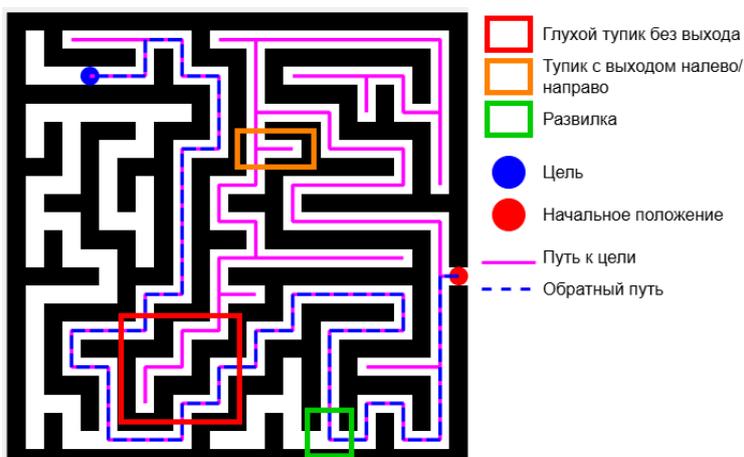


Рис. 3. Нахождение пути в лабиринте 2

робот уже побывал (замыкание). Чтобы этого избежать, требуется составлять и держать в памяти карту пройденного маршрута и делать пометки на замыкание. При обнаружении замыкания необходимо вернуться к ближайшей пройденной развилке со случайным выбором поворота и выполнить поворот в другом направлении от выполненного на предыдущем проходе развилки. Проход по лабиринту заканчивается, когда сигнал близости к объекту будет максимальным. Возврат робота с найденным объектом должен происходить по синтезированной карте пройденного маршрута путем прохода по всем шагам в обратном направлении.

На рис. 2 показан кратчайший маршрут к цели, синтезированный в креативном процессе. Более сложный случай представлен на рис. 3, где показаны два альтернативных маршрута: красный маршрут с начальным поворотом направо заходит в несколько глухих тупиков, а синий маршрут (пунктирный) с начальным поворотом налево после нескольких тупиков все-таки находит цель.

Заключение

Разумные роботы, обладающие поведением, подобным человеческому, должны обладать не только когнитивными, но и креативными способностями. Элементы креативности можно исполь-

зовать для решения роботами специфических задач, связанных с поиском новых решений, таких как поиск объектов в среде с множеством препятствий, определение новых целей и создание новых моделей поведения, а также исследование среды с построением ее когнитивной модели. Решение этих задач необходимо, если робот должен выполнить определенное задание, например, поиск скрытого объекта, в новой неизвестной ему среде. Проведенные эксперименты, направленные на решение задачи поиска роботом скрытого объекта, показали, что использование исследовательской модели креативности при синтезе маршрута к объекту позволяет значительно сократить число шагов поиска и находить маршрут, приводящий к цели, альтернативный тупиковому. Проведенный анализ дает возможность сделать выводы о полезности креативного подхода в робототехнике, в частности, для повышения эффективности решения роботом навигационных задач в незнакомых средах.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00553-25-00 от 25.12.2024 «Исследование методов организации навигации роботов в сложных недетерминированных средах на базе теории когнитивного представления пространства» (FNRG-2025-0007 1024050200005-9-1.2.1;2.2.2).

Литература

1. *Станкевич Л.А., Юревич Ю.И.* Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике: учебное пособие. С.-Петербург, Изд-во СПбПУ, 2012. 166 с.
2. *Николенко С.И. и др.* Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
3. *Guyon I. et al.* Attention is All you Need [Электронный ресурс] / A. Vaswani et al. // *Advances in Neural Information Processing Systems*. V. 30 / ed. by I. Guyon et al. Curran Associates, Inc., 2017. URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Paper.pdf.
4. *Станкевич Л.А.* Когнитивные системы и роботы. СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 631 с.
5. *Шумский С.А.* Машинный интеллект. Очерки по теории машинного обучения и искусственного интеллекта. М.: РИОР, 2019. 340 с.
6. *Станкевич Л.А., Бахшиев А.В., Лопота А.В.* Гуманоидные роботы. СПб. : Медиапир, 2020. 310 с.
7. *Brohan A. et al.* Rt-1: Robotics Transformer for Real-World Control at Scale / arXiv:2212.06817 [cs]. - arXiv, 2022.
8. *Brohan A. et al.* Rt-2: Robotics Transformer for Real-World Control at Scale / arXiv:2212.06817 [cs]. - arXiv, 2023.
9. *Алексеев А.Ю.* Принципы креативной робототехники // *Технологос*. 2020. № 4. С. 5–17.
10. *Boden M.A.* Computer models of creativity. *Handbook of Creativity* / R.J. Sternberg (ed.). Cambridge University Press, 1999. 351–372.
11. *Boden M.A.* The creative mind: myths and mechanisms, 2nd edn, Routledge, London, UK, 2004.
12. *Крылов Н.А.* Моделирование креативности в искусственном интеллекте: возможности и границы // *Семиотические исследования. Semiotic studies*. 2024. Т. 4, № 3. С. 31–36. DOI: <http://doi.org/10.18287/2782-2966-2024-4-3-31-36>. DOI: 10.15593/perm.kipf/2020.4.01.

Нарушения зрительно-пространственной памяти при инсульте: факторы риска

Д.И. Сундуков, В.Н. Григорьева

Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород;
dmitrij.sundukov@gmail.com

Введение

Зрительно-пространственная память (ЗрПрП) рассматривается как способность сохранять зрительно воспринимаемые признаки и объекты в течение короткого периода времени. Обеспечивая возможность запоминать расположение объектов в быту и за пределами дома, она является необходимой для выполнения множества повседневных задач [1].

Нарушения ЗрПрП после инсульта наблюдаются как изолированно, так и являются важным компонентом синдрома постинсультных когнитивных расстройств [2]. Для полноценной работы с такого рода пациентами необходимо дополнительное нейропсихологическое обследование, однако оно может быть трудоемким и времязатратным.

В связи с этим ключевое значение приобретает выявление факторов, влияющих на выраженность и стойкость подобных расстройств, и создание моделей, способных математически прогнозировать развитие выраженных нарушений памяти у пациентов с инсультом в целях отбора таких пациентов для последующего специализированного обследования и лечения.

Цель. Исследовать факторы риска выраженных и стойких нарушений зрительно-пространственной памяти у пациентов в остром периоде полусферного ишемического инсульта.

Материалы и методы. Обследованы 109 пациентов в начале (3–4 день) острого периода ишемического инсульта полусферной локализации (47 женщин и 62 мужчины, средний возраст $68,7 \pm 7,4$ лет) на базе Нижегородского регионального сосудистого центра (РСЦ) областной больницы им. Н.А. Семашко, которые были разделены на основную (88 пациентов – 39 женщин и 49 мужчин, средний возраст $68,6 \pm 7,9$ лет) и тестовую (21 пациент – 13 мужчин и 8 женщин, средний возраст $68,8 \pm 7,6$ лет) выборки.

По данным клинико-анамнестического и лабораторного исследований были выделены факторы, которые могли потенциально повлиять на выраженность и стойкость расстройств ЗрПрП, в число которых вошли возраст > 75 лет, пол, уровень образования ниже высшего, наличие сахарного диабета (СД), фибрилляции предсердий (ФП) и ожирения (индекс массы тела (ИМТ) равен $30,0 \text{ кг/м}^2$ и более).

По данным инструментального исследования, проведенного с помощью МРТ и КТ головного мозга, исследовались размер и локализация очага инсульта, в зависимости от которой определялась принадлежность очага к каротидной (КС) или вер-

тебробазилярной (ВБС) системам кровоснабжения [3, 4]. Данное разделение рассматривалось как потенциальный фактор выраженности расстройств ЗрПрП. Для оценки стойкости расстройств ЗрПрП было проведено разделение областей головного мозга, ассоциированных с ВБС, на затылочно-височно-гиппокампальные и затылочно-теменно-таламические [4].

Размер рассматривался как потенциальный фактор и стойкости, и выраженности нарушений ЗрПрП, и разделялся по диаметру очага инсульта на крупный (при 20 мм и более) и некрупный (менее 20 мм).

По данным нейропсихологического обследования, проводимого с помощью методики «Геритрическая сложная фигура» (англ. сокращение – GCF), выявлялась степень нарушения ЗрПрП. При этом выраженными считались расстройства при результате 12 и менее, а невыраженными при результате 13 и более баллов по данной методике GCF [5]. Пациенты с выраженными нарушениями ЗрПрП, вошедшие в основную выборку, составили группу ЗрПрП-ВН, с невыраженными нарушениями ЗрПрП – группу ЗрПрП-неВН.

15 пациентов основной выборки с локализацией очага инсульта в системе кровоснабжения ВБС были оценены повторно через 12–13 дней после первого обследования. Вычислялся абсолютный прирост значений для каждого пациента, а затем нормализованный (отношение абсолютного прироста к максимально возможному). Если нормализованный прирост составлял 50 % и менее, то пациенты с такими нарушениями выделялись в группу со стойкими нарушениями зрительно-пространственной памяти (группа ЗрПрП-СН). Если нормализованный прирост составлял более 50 %, то пациенты с такими нарушениями выделялись в группу с нестойкими нарушениями зрительно-пространственной памяти (группа ЗрПрП-неСН).

Статистическая обработка проводилась с использованием программы «IBM SPSS Statistics 27» для Windows. Распределение данных оценивалось с помощью критерия Шапиро – Уилка. При нормальном распределении данные описывались как среднее и стандартное отклонение ($M \pm SD$), а при ненормальном как медиана и квартили ($Me [25–75]$). Номинальные данные были представлены в виде абсолютных значений.

Сравнительный анализ групп ЗрПрП-ВН и ЗрПрП-неВН проводился по потенциальным факторам риска ЗрПрП-ВН с использованием критерия χ^2 Пирсона. Аналогичным образом проводился сравнительный анализ групп ЗрПрП-СН и ЗрПрП-неСН. Значимость различий определялась при $p < 0,05$.

Факторы риска выраженных расстройств ЗрПрП, оказавшиеся значимыми, были включены в прогностическую модель, оценка качества которой проводилась на вышеописанной тестовой выборке пациентов с помощью метода бинарной логистической регрессии по алгоритму «Enter» с помощью таких критериев, как коэффициент детерминации (R-квадрат Нэйджелкерка и Кокса – Снелла), критерий согласия Хосмера – Лемешева, оценки точности, чувствительности и специфичности.

Результаты

Выраженные нарушения ЗрПрП наблюдались у 32 из 88 пациентов (36,4 %) основной и 7 из 21 пациентов (33,3 %) тестовой выборки. По данным сравнительного анализа выявлены следующие значимые факторы выраженных нарушений ЗрПрП: ассоциированность очага инсульта с ВБС ($p < 0,001$), размер очага инсульта более 20 мм в диаметре ($p = 0,017$), уровень образования ниже высшего ($p = 0,026$), возраст более 75 лет ($p = 0,038$). Данные оценки качества прогностической модели представлены в таблице. Уравнение бинарного классификатора представлено ниже:

$$P(X) = \frac{1}{1 + e^{-(1.012 + 0.978X_1 + 0.605X_2 + 0.326X_3 + 0.345X_4)}}$$

где значения факторов: X_1 – ассоциированность очага инсульта с ВБС (1 – да, 0 – нет), X_2 – размер очага инсульта более 20 мм в диаметре (1 – да, 0 – нет), X_3 – уровень образования ниже высшего (1 – да, 0 – нет), X_4 – возраст старше 75 лет (1 – да, 0 – нет).

Критерии оценки качества прогностической модели факторов риска выраженных нарушений зрительно-пространственной памяти

Показатели оценки качества модели	Значение
R-квадрат Нэйджелкерка	0,737
R-квадрат Кокса – Снелла	0,531
Критерий согласия Хосмера – Лемешева	0,967
Точность	85,7
Чувствительность	71,4
Специфичность	92,9

Стойкие нарушения ЗрПрП у пациентов с локализацией очага в ВБС наблюдались у 11 из 15

пациентов (73,3 %). По данным сравнительного анализа ЗрПрП-СН и ЗрПрП-неСН выявлено, что на стойкость статистически значимо влияли затылочно-височно-гиппокампальная локализация очага инсульта ($p = 0,015$) и возраст старше 75 лет ($p = 0,047$).

Заключение

Выраженные нарушения зрительно-пространственной памяти встречаются примерно у трети пациентов в остром периоде полушарного ишемического инсульта. Значимыми факторами выраженных нарушений зрительно-пространственной памяти являются крупный размер очага инсульта, уровень образования ниже высшего и возраст старше 75 лет. Разработана прогностическая модель факторов риска зрительно-пространственной памяти. Выявлено, что затылочно-височно-гиппокампальная локализация очага инсульта и возраст старше 75 лет являлись значимыми факторами стойкости нарушений зрительно-пространственной памяти в остром периоде полушарного ишемического инсульта.

Литература

1. Lugtmeijer S., Schneegans S., Lammers N.A., Geerligs L., de Leeuw F.E. et al. Consequence of stroke for feature recall and binding in visual working memory. *Neurobiol Learn Mem.* 2021 Mar; 179:107387. doi: 10.1016/j.nlm.2021.107387.
2. Lugtmeijer S., Geerligs L., de Leeuw F.E., de Haan E.H.F., Kessels R.P.C., Visual Brain Group. Are visual working memory and episodic memory distinct processes? Insight from stroke patients by lesion-symptom mapping. *Brain Struct Funct.* 2021 Jul; 226(6):1713–1726. doi: 10.1007/s00429-021-02281-0. Epub 2021 Apr 29.
3. Giotta Lucifero A., Baldoncini M., Bruno N., Tartaglia N., Ambrosi A., Marseglia G.L., Galzio R., Campero A., Hernesniemi J., Luzzi S. Microsurgical Neurovascular Anatomy of the Brain: The Anterior Circulation (Part I). *Acta Biomed.* 2021. Aug. 26; 92(S4):e2021412. doi: 10.23750/abm.v92iS4.12116.
4. Giotta Lucifero A., Baldoncini M., Bruno N., Tartaglia N., Ambrosi A., Marseglia G.L., Galzio R., Campero A., Hernesniemi J., Luzzi S. Microsurgical Neurovascular Anatomy of the Brain: The Posterior Circulation (Part II). *Acta Biomed.* 2021. Aug. 26; 92(S4):e2021413. doi: 10.23750/abm.v92iS4.12119.
5. Poreh A., Levin J.B., Teaford M. Geriatric Complex Figure Test: A test for the assessment of planning, visual spatial ability, and memory in older adults. *Appl Neuropsychol Adult.* 2020. Mar-Apr.; 27(2):101-107. doi: 10.1080/23279095.2018.1490288.

Частотно-зависимая нелинейная динамика ЭЭГ и HRV при фотостимуляции в тета-альфа-диапазоне

С.Б. Танасова, А.Т. Бондарь

Институт биофизики клетки РАН, Пущино

Ритмическая фотостимуляция представляет собой уникальный метод нейросенсорной модуляции, позволяющий выявлять частотно-специфические механизмы взаимодействия между кортикальными структурами и вегетативной регуляцией сердечной деятельности, опосредованной периферической нервной системой. Нейрофизиологические отклики на визуальные стимулы с периодической структурой (steady-state visual evoked potentials, SSVEP) обладают высокой воспроизводимостью и отражают как резонансные свойства нейронных ансамблей, так и уровень их вовлеченности в когнитивную регуляцию [1].

Современные исследования показывают, что при низкочастотной стимуляции (в диапазоне тета-альфа) в ответной активности мозга формируются спектрально сложные и нелинейные по своей структуре паттерны, включая гармоники [2], что ставит под сомнение предположение о строго линейной природе SSVEP-ответов. Эти отклики могут быть чувствительными к параметрам стимуляции, в том числе к симметрии зрительного ввода и фазовой структуре сигнала.

Ритмическая фотостимуляция служит инструментом не только для модуляции кортикальной активности, но и для выявления изменений вегетативной регуляции. Вариабельность сердечного ритма (HRV), отражающая активность вегетативной нервной системы, связана с функциональной активностью ряда отделов головного мозга, включая префронтальную кору, переднюю поясную извилину, миндалину и ствольные структуры [3]. Это позволяет рассматривать HRV как индикатор согласованного взаимодействия между центральной нервной и сердечно-сосудистой системами, работу которой регулирует вегетативный отдел периферической нервной системы.

В настоящем исследовании нами использовались два протокола фотостимуляции с одновременной регистрацией ЭЭГ и ЭКГ. Первый протокол включал частотное сканирование от 4 до 12 Гц с шагами 0,2, 0,3 и 0,4 Гц. Стимуляция проводилась синусоидально модулированным светом ($\lambda \sim 625$ нм) через закрытые веки. Вторым протоколом был сфокусирован на сравнении устойчивых реакций на частоты 7,5 Гц и 11 Гц – с симметричной и асимметричной подачей стимулов.

Оценка откликов включала анализ амплитудных характеристик первых трех гармоник и расчет коэффициента нелинейных искажений (THD), отражающего относительный вклад второй и третьей гармоник по отношению к основной частоте. Низкие значения THD соответствовали линейной зоне, тогда как высокие указывали на выраженную нелинейность. Формула расчета коэф-

фициента гармонических искажений (THD) выглядит следующим образом:

$$THD = \left(\frac{A_2^2 + A_3^2}{A_1^2} \right)^{1/2} \cdot 100 \%,$$

где A_1 , A_2 , A_3 – амплитуды первой, второй и третьей гармоник соответственно.

Полученные данные показали, что каждая гармоника достигает максимальной амплитуды на своей собственной частоте, что отражает неоднородную и избирательную по частоте структуру нейронного ответа.

С увеличением частотного шага 0,2 до 0,4 Гц амплитудные пики становятся менее выраженными и сглаженными, что указывает на эффект элайзинга – наложение спектральных компонент, вызванное недостаточной частотной точностью. Это означает, что для надежного выявления резонансных откликов и точной оценки их параметров необходима высокая частотная разрешающая способность стимуляции.

Анализ топографической организации ЭЭГ-ответов при стимуляции с частотой 7,5 Гц, относящейся к нелинейной зоне, выявил сложную и функционально неоднородную структуру нейронного отклика. Наряду с основной гармоникой в спектре регистрировались дополнительные компоненты, которые не всегда соответствуют точным кратным исходной частоте. В связи с этим для обозначения второй, третьей и последующих компонент использовался термин «псевдогармоники» (X2–X4), подчеркивающий их нелинейное происхождение (рис. 1). Каждая из них отражает отдельную частотную составляющую, возникающую в результате нелинейных преобразований основного ритмического сигнала.

На топографических картах распределения гармоник видно, что амплитудные максимумы каждой из них располагаются в различных кортикальных зонах, а не сосредоточены в одном и том же участке коры. Это означает, что каждая гармоника может иметь собственный кортикальный генератор, топографически разобценный от других.

Эта пространственная диссоциация подчеркивает, что реакция мозга на стимул с частотой 7,5 Гц не является единым откликом, а скорее представляет собой многокомпонентную, модульную реакцию различных нейронных ансамблей, каждый из которых может быть избирательно чувствителен к определенной спектральной компоненте. Такая картина не согласуется с традиционным подходом, при котором отклик на стимуляцию интерпретируется в рамках одного канала (одного электрода) и одной гармоники – в этом случае существенная часть информации попросту теряется.

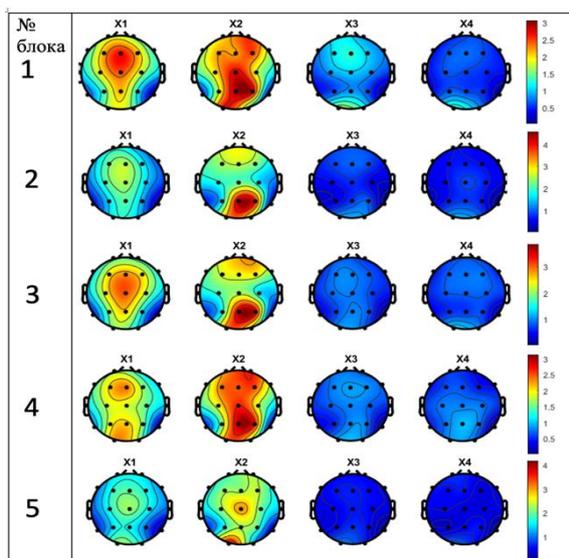


Рис. 1. Пространственная локализация амплитудных максимумов (локусов) гармонических компонент в ответ на стимуляцию световым сигналом с частотой 7,5 Гц. X1 – основная частота, X2 – вторая псевдогармоника, X3 – третья псевдогармоника, X4 – четвертая псевдогармоника

При стимуляции с частотой 7,5 Гц, вызывающей нелинейный отклик, амплитудные пики гармоник могут мигрировать по поверхности коры. В результате сигнал, регистрируемый под одним и тем же электродом, в разное время может отражать вклад разных гармонических компонент, обусловленных миграцией генераторов. Поэтому для точной интерпретации ЭЭГ-ответа необходим топографический анализ каждой гармоники.

При многократном предъявлении ритмического стимула наблюдается тенденция к сближению локусов различных гармоник – топографические максимумы начинают перекрываться. Это может быть проявлением нейропластических процессов: при повторной стимуляции мозг оптимизирует свою реакцию, объединяя ранее разрозненные генераторы в более интегрированный, согласованный отклик. С третьего блока стимуляции на топографических картах видно, что различия в расположении пиков уменьшаются, особенно между второй и третьей гармоникой.

Такая динамика позволяет предположить, что при стимуляции с частотой 7,5 Гц, вызывающей нелинейный отклик, мозг не просто реагирует на внешний ритм, а активно перестраивает свою сетевую организацию. Постепенный переход от разрозненной (модульной) к более согласованной (интегрированной) структуре отражает процессы ритмической сенсорной интеграции и нейропластической адаптации.

Частота 11 Гц соответствует линейной зоне спектра и характеризуется выраженным преобладанием первой гармоники.

Коэффициент нелинейных искажений (THD) сохранял низкие и стабильные значения как внутри каждого блока стимуляции, так и между блоками, демонстрируя отсутствие значимых временных флуктуаций в спектральной структуре ответа.

Такая устойчивость указывает на формирование стабильного генераторного паттерна с ограниченным числом вовлеченных зон, преимущественно в затылочной и теменной коре.

В отличие от нелинейной зоны, здесь не наблюдалось топографической миграции гармоник: амплитудные максимумы сохраняли свое расположение в течение всей серии стимулов, что свидетельствует о стационарной пространственно-спектральной организации нейронного ответа при стимуляции в диапазоне 11 Гц (рис. 2).

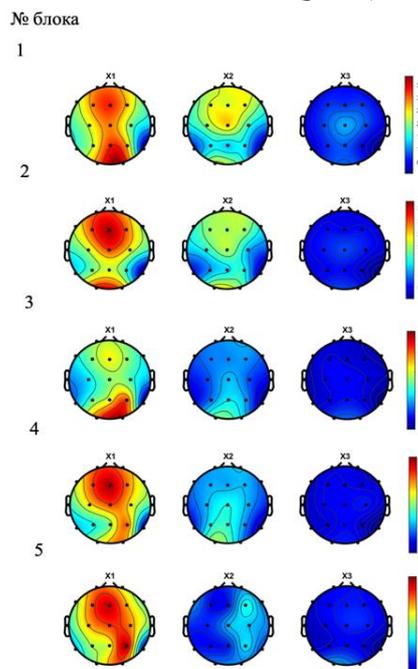


Рис. 2. Локализация локусов амплитудных максимумов псевдогармоник в стимуляционных сигналах с частотой 11 Гц. X1 – первая гармоника, X2 – вторая гармоника, X3 – третья гармоника

Таким образом, результаты сравнения показывают, что стимуляция на частоте 7,5 Гц вызывает более вариативный, многокомпонентный отклик с выраженными нелинейными характеристиками и миграцией генераторов. В отличие от этого, стимуляция 11 Гц формирует линейный и стационарный паттерн с устойчивой локализацией отклика.

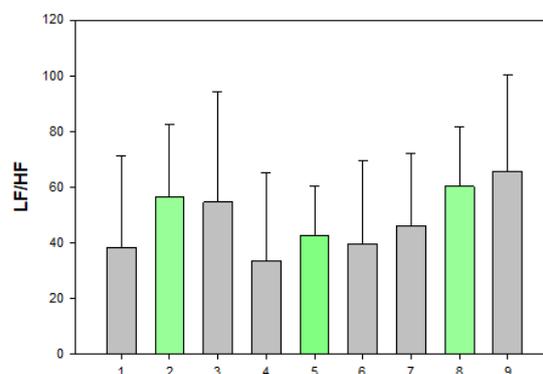


Рис. 3. Соотношение LF/HF на разных этапах эксперимента (N = 6). Зеленым цветом выделены стимуляционные условия: 7,5 Гц (2), 11 Гц (5) и комбинированная стимуляция (8). Остальные столбцы (1, 3, 4, 6, 7, 9) соответствуют фоновым периодам до и после стимуляции

Чтобы оценить согласованность работы центральной и периферической нервной системы при стимуляции на разных частотах, нами проводился анализ variability сердечного ритма (HRV).

При этом такие показатели, как средняя частота сердечных сокращений (ЧСС), оказались менее чувствительными, поскольку отражают лишь усредненное значение за период и не фиксируют временную или спектральную структуру регуляторного отклика. В отличие от них, спектральные параметры HRV – LF, HF и их соотношение – позволяют оценить динамический баланс между симпатическим и парасимпатическим влиянием и дают более полное представление о вегетативной активности в условиях частотно-зависимой стимуляции.

Наиболее информативным оказался индекс LF/HF (см. рис. 3), поскольку он отражает не просто уровень активности, а соотношение между симпатическим и парасимпатическим влиянием. Например, если оба компонента (LF и HF) растут одновременно, общий уровень активности меняется, но баланс между системами может оставаться прежним. В таких случаях именно изменение соотношения LF/HF помогает заметить даже незначительные сдвиги в вегетативной регуляции, которые не видны по отдельным значениям.

Анализ показал, что при стимуляции в нелинейной зоне спектра (7,5 Гц) индекс LF/HF систематически возрастал по сравнению с фоновыми значениями и сохранял устойчивость между блоками,

что может свидетельствовать о сдвиге в сторону симпатической активности. В свою очередь, при стимуляции на частоте 11 Гц (линейная зона) изменения индекса LF/HF были менее выраженными и не выходили за пределы индивидуальной variability, что указывает на слабую вовлеченность вегетативных контуров при такой частоте воздействия.

Таким образом, индекс LF/HF можно рассматривать как чувствительный интегральный показатель, отражающий характер нейровегетативной интеграции и позволяющий оценивать согласованность работы центральной и периферической нервной системы при стимуляции на разных частотах.

Литература

1. *Herrmann C.S.* Human EEG responses to 1–100 Hz flicker: resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena // *Experimental Brain Research*. 2001. V. 137, no. 3–4. P. 346–353. DOI: 10.1007/s002210100682.
2. *Bondar A. and Shubina L.* Nonlinear reactions of limbic structure electrical activity in response to rhythmical photostimulation in guinea pigs. *Brain Research Bulletin* 143 (2018) 73–82.
3. *Thayer J.F., Åhs F., Fredrikson M., Sollers III J.J., & Wager T.D.* A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: implications for heart rate variability as a marker of stress and health // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2012. V. 36, no. 2. P. 747–756. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2011.11.009.

Бинарные склейки как модельный пример для категорного описания нейронных сетей

Г.К. Толоконников

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва; admcit@mail.ru

Рассматривается математический фрагмент категорной модели нейронных сетей, изучаемой в категорной теории систем. Приведены аналоги для склеек теорем о дуальности и принципе двойственности в категориях. Разбирается пример языка направленных склеек, иллюстрирующий указанные теоремы о новом виде категорной дуальности, нашедшей применения в теории искусственных нейронных сетей.

Категорные склейки как математический аппарат категорной теории систем

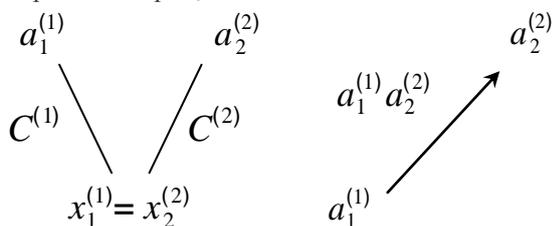
Математическим аппаратом развиваемой автором категорной теории систем [1], формализующей функциональные системы П.К. Анохина [2], является новый раздел теории категорий – категорные склейки и сверточные поликатегории, оказавшиеся полезными для моделирования искусственных нейронных сетей произвольной топологии [3] и сетей живых нейронов со спайковой и неспайковой коммуникацией. Открытый автором новый вид категорной дуальности используется для нейросетей в работе [3]. В данной работе мы приводим общие теоремы об имеющихся трех видах дуальности в категорных бинарных склейках, обобщающих, в частности, обычные категории. Детально разбираем пример бинарных склеек упорядоченных пар («закрепленные векторы» на плоскости), иллюстрируя общие теоремы и весьма громоздкий формализм (обычное явление в теории категорий), развитый в теории склеек, в целях более легкого восприятия развиваемого подхода.

Ввиду указанной громоздкости за детальными определениями, которые здесь используются, просим обратиться к работам [1, 4].

Используется стандартный логико-математический язык (см., например, [5]), с 8 сортами и их копиями для переменных и других букв, в том числе операции свертки $(x_k^{(i)}, a_k^{(i)}, C^{(i)}, \mu^{(i)}, \dots)$, графическое изображение формул склеек

$$C^{(1)} x_k^{(1)} = a_k^{(1)} \wedge C^{(2)} x_q^{(2)} = a_q^{(2)} \wedge x_k^{(1)} = x_q^{(2)},$$

аналогичное принятому в работе [6] в аксиоматике теории категорий, имеет вид



Склейки состоят из связанных гребней, в которых для бинарных склеек зубьев всего два, как на схеме выше. Категорной системой называется связный гребень, в общем случае полученный с помощью операции свертки из других гребней (подсистем), процедура сбора системы проводится с помощью свертки, моделирует системообразующий фактор для системы.

Имеется операция дуальности по сортам D , аналогичная дуальности в теории категорий при замене направления стрелок, и операция B дуальности по сверткам, новый вид дуальности. Эти операции задают для каждой F формулы языка (в том числе замкнутой формулы – высказывания) ее дуальные образы BF, DF, BDF, \dots . Справедливы следующие теоремы, которые далее явно применяются для разбираемого примера.

Теорема (принцип дуальности). Пусть формула A исходного языка бинарных склеек выводима, тогда дуальная по сортам формула DA (соответственно, дуальная по сверткам формула BA) также выводима.

Теорема. Повторное применение операций D и B дает копию исходной склейки S ($DDS \approx S, BBS \approx S$), применение D и потом B дает копию склейки, полученной применением к исходной склейке сначала B и потом D ($BDS \approx DBS$), применение D или B к склейке, полученной применением D и B , дает копию исходной склейки ($DBDS \approx S, BDBS \approx S$).

Таким образом, имеется всего три различных дуальности, D, B, BD . Отметим, что BD -дуальность нашла применение для построения сопряженного графа нейросети в подходе С. Осовского в теории искусственных нейронных сетей [4].

В разбираемом примере принята интерпретация склейки в виде векторов на плоскости с целыми неотрицательными началами и концами (справа на схеме формул). Проекция $a_k^{(i)}$ – это целые точки на первом квадранте плоскости: $a = (m, n)$. Имена имеют вид пары ab , первая буква имеет сорт 1 – координаты начала, вторая буква имеет сорт 2 – координаты конца. $x_k^{(1)} = a_k^{(1)} a_q^{(2)}$, так как $a^{(1)} = C^{(1)} x^{(1)}$, то имен сорта 1 много, по выбору $a^{(2)}$. Имена сорта 2 – это $x_q^{(2)} = a_i^{(1)} a_q^{(2)}$, их много по выбору первой буквы. Равенство $x_k^{(1)} = x_q^{(2)}$ интерпретируется как приравнивание имен до вида $x_q^{(2)} = a_i^{(1)} a_q^{(2)} = x_i^{(1)}$.

Литература

1. *Толоконников Г.К.* Категорные склейки, категорные системы и их приложения в алгебраической биологии // Биомашсистемы. 2021. Т. 5, № 1. С. 148–235.
2. *Анохин П.К.* Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем // Принципы системной организации функций. М. : Наука, 1973. С. 5–61.
3. *Tolokonnikov G.K.* Convolution Polycategories and Categorical Splices for Modeling Neural Networks // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. V. 938. P. 259–267.
4. *Tolokonnikov G.K.* Categorical model of neural networks. <https://openreview.net/group?id=mathai.club/MathAI/2025/Conference#tab-accept-oral>.
5. *Драгалин А.Г.* Математический интуиционизм. Введение в теорию доказательств. М. : Наука, 1979. 256 с.
6. *Hatcher W.S.* The logical foundations of mathematics. Perg. Pr., 1982. 320 p.

Новое представление «What is life?»

О.Е. Филатова¹, В.В. Еськов², И.Ю. Добрынина², В.М. Еськов¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Сургутский филиал ФГУ
«ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований»

²Сургутский государственный университет

В 1944 году нобелевский лауреат E. Schrödinger попытался дать ответ на этот вопрос. Однако через 4 года основоположник теории информации W. Weaver дал полный и аргументированный ответ на этот вопрос. Он выделил все биосистемы в отдельный (третий) тип систем и предложил их вывести за пределы всей современной науки. Экспериментальные доказательства всему этому позже представила научная школа профессора М.М. Еськова. За последние 25 лет было доказано, что статистика не может описывать биосистемы (W. Weaver был прав).

Следует отметить, что публикация W. Weaver вышла в 1948 году («Science and Complexity»), но за год до этого выдающийся биомеханик 20-го века Н.А. Бернштейн попытался доказать свою гипотезу о «повторении без повторений». Оба эти выдающиеся ученые были первыми реальными преобразователями всей современной науки.

Подчеркнем, что речь идет не столько о живых системах (биосистемах или системах третьего типа – СТТ) по классификации W. Weaver, речь идет о всей науке, т. к. физика и математика активно поддерживают биологию, медицину, психологию и другие науки о жизни, речь идет о статистике в изучении СТТ.

W. Weaver первый заговорил о том, что теория динамических систем (ТДС), т. е. детерминизм и вся стохастика не могут описывать СТТ. Только в 1999 году нобелевский лауреат В.Л. Гинзбург выступил против редукционизма. Он писал: «Вместе с тем, можно ли считать, что возможность редукции биологии к современной физике несомненна? <...> дать положительный ответ было бы, как мне кажется, неправильно <...> мы даже на фундаментальном уровне еще не знаем чего-то необходимого для редукции» [1].

Очевидно, что на сегодня два нобелевских лауреата (E. Schrödinger и В.Л. Гинзбург) вместе с W. Weaver и Н.А. Бернштейном выступили против применения ТДС и статистики в описании биосистем. Однако особой реакции на работы этих выдающихся ученых пока не последовало. Эта ситуация вполне понятна, т. к. никто до них не представил веских экспериментальных доказательств всем этим гипотезам.

Очевидно, что требуются веские экспериментальные доказательства тому, почему эти ученые были против редукции всех наук о жизни и невозможны для СТТ и все модели современной физики и математики. Необходимо было доказать, почему все живые системы (СТТ – по классификации W. Weaver) не могут описываться современной наукой.

W. Weaver пытался это доказать, выделив биосистемы в системы третьего типа – СТТ. Логика его рассуждений нам вполне понятна: теория динамических систем строго связывает прошлое и будущее изучаемых систем. В детерминизме (ТДС) работает задача Коши, где конечное состояние системы (точка) $x(t_i)$ всегда прогнозируется и повторяется.

Однако уже для стохастических систем это невозможно. Здесь повторение начальных условий не может также повторить конечное состояние $x(t_i)$. Для непрерывных случайных величин (НСВ) эти точки $x(t_i)$ мы никогда уже не повторим. Для систем 2-го типа (стохастических) будущее тоже невозможно повторить и точно спрогнозировать. Появляется уже первая неопределенность: будущее в виде $x(t_i)$ для стохастики уже не может прогнозироваться.

В этом сущность «Complexity» у W. Weaver. Но чем отличается СТТ, что такого особенного у биосистем? На этот вопрос никто (до нас) не ответил. Однако ответ очевиден: как одна точка $x(t_i)$ не может описывать стохастические системы (системы 2-го типа), так и целая выборка уже не может описать живые системы – СТТ.

Это следует из самой логики работ W. Weaver. Но на это никто не обратил внимания [2–5]. Надо было ответить на вопрос: почему выборка не репрезентативна? Почему выборка не может описывать СТТ? Это очень странно для нас, но совершенно нам непонятно, почему за 150 лет никто не проверял статистическое совпадение двух соседних выборок любых параметров $x(t)$ любых функций любого человека на Земле?

Это весьма элементарный вопрос: мы получили выборки любого параметра на интервале Δt_1 и далее 2-ю выборку этого же параметра на интервале Δt_2 . Вопрос: с какой вероятностью $P_{1,2}$ эти две выборки любого параметра $x(t)$ совпадут? Далее, мы поставили базовый вопрос: с какой вероятностью совпадут выборки на интервалах $\Delta t_1, \Delta t_2 \dots \Delta t_n$ все эти n выборок? Для этого мы рассчитывали матрицы парных совпадений таких n выборок для одного испытуемого (в покое).

Обычно брали 15 последовательных измерений $x(t)$ для одного испытуемого и затем рассчитывали все возможные вероятности (частоты) их парных совпадений p_{ij} . Оказалось, что обычно эти значения $p_{ij} \leq 15\%$, а для ряда параметров $p_{ij} < 0,05$. Это был крах всей статистики, т. к. в статистике требуют не менее 95% статистических совпадений выборок. У нас оказалось все наоборот.

Это и есть эффект Еськова – Зинченко (ЭЕЗ) – сначала в биомеханике, а затем и для всех пара-

метров организма человека. Не статистической устойчивости выборок. ЭЭЗ доказал, что любая выборка уникальна. Ее невозможно использовать для прогноза будущего состояния любой биосистемы. Любая выборка нерепрезентативна, нет прогноза будущего.

Далее мы начали проверять разные группы испытуемых, которые во всех науках о СТТ считались однородными. Оказалось, что однородных групп в природе не существует.

Выборка каждого человека из якобы однородной группы уникальна, она имеет свою, особую генеральную совокупность. Напомним, что если испытуемые связаны якобы однородной группой, но не имеют общей генеральной совокупности, то такая группа не может быть однородной.

Это получило название эффекта Еськова – Филатовой (ЭЕФ) в виде потери однородности групп. ЭЕФ ставит перед физиологией и всем естествознанием глобальные проблемы статистической неустойчивости любых выборок параметров ССС x_i их $f(x)$, СПС, $A(t)$.

В этом эффекте доказывается отсутствие реальной возможности обнаружения всех каких-либо статистических закономерностей группы и отсутствие индивидуумов. Суть этого эффекта – группа из 15 разных испытуемых (например, больных) может демонстрировать более выраженные статистические совпадения выборок КИ, их сигнальных плотностей сигнала – СПС и автокорреляций – $A(t)$, чем отдельный испытуемый, находящийся в неизменном гомеостазе и у которого подряд регистрировали 15 раз выборки КИ.

Иными словами, отдельный человек может быть менее похож на самого себя (в режиме $n = 15$ повторений регистрации КИ), чем группа разных людей между собой [2–5]. Это тоже очень неожиданный результат из ЭЕФ и его мы доказываем экспериментально.

Для любого ученого, который изучает биосистемы и законы с азами статистики, очевидно, что дальше статистика не может использоваться. Невозможно изучать в рамках статистики неустойчивые выборки и неоднородные группы испытуемых. Именно этим занимаются науки о живых системах последние 150 лет.

Очевидно, что W. Weaver был прав, СТТ не могут быть объектом современной науки, биосистемы невозможно описывать и прогнозировать ТДС и статистики.

Однако и E. Schrödinger сильно ошибался. Он надеялся, что биосистемы будут описываться в рамках физики. Это было ошибочно. Нужна новая

наука для СТТ. Далее, он ошибался в том, что физика примет эти новые модели для биосистем. Пока это еще не произошло [2–5].

В целом, доказанные ЭЭЗ и ЭЕФ показали полный уход всех наук о жизни из области современной математики и физики. СТТ не могут далее оставаться объектом физики и математики (точно не объект ТДС).

Очевидно, что возникает острая необходимость в создании новой науки. Именно этим мы и занимаемся последние 20 лет. Эту науку мы обозначили как теорию хаоса-самоорганизации – ТХС. Именно непрерывный и самоорганизующийся хаос характеризуют работу всех биосистем.

В первую очередь мы это доказали в биомеханике и во всей физиологии (и биофизике) нервно-мышечной системы (НМС). Далее это доказали и для сердечно-сосудистой системы – ССС человека. Это главные системы в организме любого человека.

Однако для организма человека важной является работа мозга, его нейросетей мозга – НСМ. Именно НСМ обеспечивает управление НМС и ССС и другими системами. От работы мозга зависит жизнь любого человека. Мы доказали, что НСМ также работает хаотично.

Сначала хаос начинается в НСМ, а затем усиливается на периферии. Постоянный хаос и самоорганизация всех систем организма – это точный ответ на фундаментальный вопрос науки: «What is life?».

Литература

1. Гинзбург В.Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)? // Успехи физических наук. 1999. № 169. С. 419–441.
2. Пятин В.Ф., Еськов В.В., Воробьева Л.А., Куропаткина М.Г., Сазонова Н.Н. Стохастический парадокс Еськова – Филатовой в теории *complexity* // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2018. № 2. С. 76–84.
3. Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Eskov V.M., Vokhmina Y.V. Phenomenon of statistical instability of the third type systems – complexity // Technical physics. 2017. V. 62(11). P. 1611–1616.
4. Eskov V.M., Pyatin V.F., Eskov V.V., Ilyashenko L.K. Heuristic work of the brain and artificial neural networks // Biophysics. 2019. V. 64, no. 2. P. 125–130.
5. Eskov V.V., Filatova D.Y., Ilyashenko L.K., Vokhmina Y.V. Classification of uncertainties in modeling of complex biological systems // Moscow university physics bulletin. 2019. V. 74(1). P. 57–63.

Исследование сегментной импульсной модели нейрона в задаче распознавания локаций по данным обнаружения объектов

И.С. Фомин, А.М. Корсаков

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники
и технической кибернетики, Санкт-Петербург; i.fomin@rtc.ru

Введение

Одной из важных проблем как в робототехнике, так и в других областях, которые требуют решения задачи локализации, является задача визуального распознавания локаций (Visual Place Recognition, VPR). В общем случае имеется один или несколько наборов изображений некоторой местности, которые имеют географическую или семантическую привязку к ней. Задача состоит в определении привязки только по изображениям после обучения на данных, для которых она заранее известна.

Данная проблема актуальна в основном в тех случаях, когда отсутствуют способы осуществить полноценную географическую привязку, например, если нет датчика GPS RTK или по некоторой причине нет возможности соединиться со спутниками. Кроме того, если есть возможность воспользоваться ориентирами с известными положениями, даже при наличии грубой привязки по системе глобального позиционирования, такой способ позволяет уточнить положение и ориентацию с точностью до единиц градусов и десятков или даже единиц сантиметров.

Известные подходы к решению

Задача одновременного картографирования и локализации (SLAM), в том числе по изображениям, – давно известная и хорошо разработанная область науки. Нельзя не отметить алгоритмы, использующие для навигации данные плоской лазерной дальнометрии [1, 2], которые позволяют построить плоскую карту проходимости для навигации в помещении, или трехмерную карту для задачи навигации в дорожной обстановке. Несмотря на общее высокое качество, обычно речь идет о плоской задаче, и колебания платформы приводят к ошибкам картирования и локализации.

Визуальный способ картирования и локализации (Visual SLAM, VSLAM) предназначен для построения карты и навигации в ней по моно- или стереокамере. Развитие этих подходов идет достаточно давно, начиная с известного метода PTAM [3], к методам построения плотных карт по изображениям, новым методам построения разреженных карт ORB-SLAM2 [4], ORB-SLAM3 [5]. Основная проблема этих подходов заключается в применении устойчивых особенностей изображения (feature points) для построения стереосопоставления. Их использование затруднено при работе на изображениях поверхностей без особенностей или при сильном изменении освещенности.

Частично эту проблему решают алгоритмы, использующие для навигации и определения положения визуальные ориентиры, например, [6]. Данные алгоритмы позволяют с высокой точностью определять положение и ориентацию, однако им требуется большое количество предварительно известной информации, например, определенные с известной точностью координаты и конфигурация ориентиров. Ориентиры должны быть уникальными в определенных рамках, иначе возможная путаница приведет к ошибкам локализации и распознавания положения.

Большой устойчивостью к расположению ориентиров обладают методы интерпретирующей навигации [7]. Но уникальность ориентиров и неизменность их положения остаются важными для определения факта нахождения в конкретной области пространства, однозначно определяемой комбинацией ориентиров (район информационной эквивалентности, РИЭ).

При решении задачи визуального распознавания локаций вызывает несомненный интерес нейросетевой и нейроморфный подход. Имеется достаточно большое количество методов, позволяющих эффективно распознавать локацию по изображению с использованием глубоких нейронных сетей [8] и импульсных нейронных сетей [9]. Основным недостатком существующих подходов на искусственных нейронных сетях является большая вычислительная стоимость и высокие требования к наборам данных. В свою очередь, импульсные нейронные сети рассматриваются исключительно как более энергоэффективный аналог сверточных (CNN) и полносвязных (ANN) нейронных сетей.

Подход на импульсных (спайковых) нейронных сетях по итогу рассмотрения существующих подходов представляется наиболее интересным, с точки зрения близости к тому, как задача определения местоположения решается в живой природе. В работе [10] достоверно показано, что высокоорганизованные живые организмы в процессе запоминания окружающей среды формируют некоторые нейроны, активирующиеся на распознавание определенных областей. Представляется перспективным рассмотреть задачу построения спайковой нейронной сети, в которой на каждую известную локацию в пространстве будет отвечать отдельный специально обученный нейрон.

Описание модели нейрона

В рамках выполнения настоящей работы использовалась сегментная спайковая модель нейрона (CSNM) [11]. Описание принципов класси-

фикации спайковых последовательностей, использованных здесь для сопоставления кадров, приведено в работе [12].

Предполагается, что на вход поступают спайки, которые преобразуются в синапсах в выходную величину, отображающую влияние синаптического тока на сегмент мембраны нейрона (рис. 1).

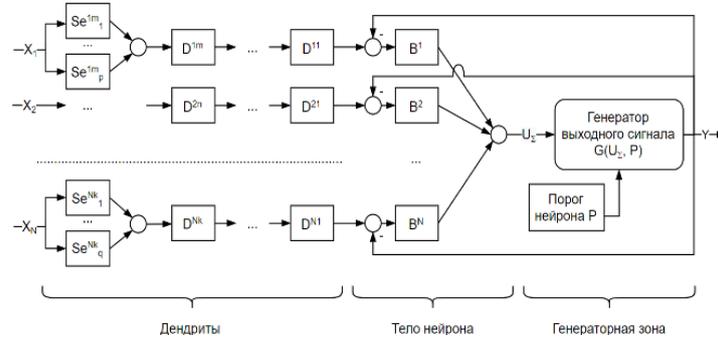


Рис. 1. Структура сегментной спайковой модели нейрона. Se^{ij}_l – входной синапс l , связанный с сегментом дендрита D^{ij} ; D^{ij} – j -й сегмент i -го дендрита; B^k – k -й сегмент тела нейрона

Данный нейрон характеризуется особым методом структурного обучения. Для заданного количества сегментов сомы сначала выполняется процедура синхронизации, когда последовательно увеличиваются длины дендритов, чтобы обеспечить одновременность прихода сигнала на сому, затем процедура нормализации, когда добавляются синапсы, чтобы компенсировать падение уровня сигнала при прохождении по элементам дендрита, комбинация этих операций обеспечивает ответ нейрона на заданный паттерн импульсов.

Формальная постановка задачи

Сформулируем задачу построения карты и локализации с использованием растущей сети из сегментных спайковых нейронов следующим образом. Пусть робот с установленной камерой совершает перемещение в пространстве, в котором расположены ориентиры известных классов. Отдельный кадр с обнаруженными ориентирами, закодированный для распознавания нейроном, можно обозначить как I_i , тогда последовательность кадров, полученная в процессе движения $S = \{I_s\}, s = 1 \dots N_s$. Отдельный нейрон карты обозначим как N_j . Нейрон N_j описывает отдельный кадр I_i (реагирует на кадр) тогда, когда при подаче на нейрон кадра I_i нейрон генерирует импульс, что можно обозначить как $N_j(I_i) = 1$. Если нейрон не описывает кадр, то $N_j(I_i) = 0$.

Таким образом, чтобы описать последовательность кадров набором нейронов, необходимо найти такой набор нейронов $M = \{N_j\}, j = 1 \dots N_M$, что для $\forall I_s \in S \exists N_j \in M: N_j(I_s) = 1$. Тогда набор нейронов M , описывающий набор кадров S , можно назвать нейроморфной картой последовательности S и обозначить как M_S .

Пусть имеется две последовательности кадров S_1 и S_2 , которые по крайней мере частично покры-

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.

вают одни и те же области. Пусть для последовательности S_1 построена нейроморфная карта M_{S_1} , тогда кадр последовательности $I_k \in S_2$ считается локализованным в карте M_{S_1} , если $\exists N_j \in M_{S_1}: N_j(I_k) = 1$.

Метод построения нейроморфной карты

Опишем предлагаемый метод построения нейроморфной карты. Сначала необходимо получить последовательность изображений с распознанными ориентирами.

Для формирования последовательностей экспериментального набора данных была использована видеочамера, установленная на мобильном роботе, который совершал поступательные и вращательные перемещения в офисном помещении, наполненном следующими объектами – столы, стулья, ПК, мониторы и т. п. На части кадров, содержащих все необходимые объекты, был обучен детектор типа YOLO [13] с использованием пакета Ultralytics [14].

Полученные после обработки последовательностей обученным детектором данные обнаружения содержали неравномерное количество объектов разных классов в различных областях кадра. Используемая сегментная спайковая модель нейрона в задаче распознавания последовательности импульсов принципиально способна обрабатывать фиксированное число входных линий импульсов, в которых может быть закодирована информация. Неравномерные число и распределение объектов не позволяют использовать данные обнаружения для кодирования кадра напрямую.

Для преобразования кадров в их нейроморфные представления был предложен подход, сходный с рецептивным полем восприятия визуальной информации у живых организмов. Горизонтальное поле кадра делится на несколько областей, которые назовем рецептивными полями. Для каждого

поля выбирается один объект каждого класса из представленных. Кодирование положения осуществлялось временной задержкой, аналогично [15]. Задержка импульса прямо пропорциональна отстоянию горизонтальной координаты объекта от левого края кадра. Если в поле нет ни одного объекта некоторого класса, он кодируется максимальной задержкой 0,2 с.

Так как экспериментально показано, что нейрон устойчив к отклонению импульсов от задержек, которым они были обучены, а также к отсутствию некоторых объектов при общем большом количестве дендритов, полученный нейроморфный классификатор принципиально способен устойчиво распознавать как соседние кадры в той же последовательности, так и кадры из других последовательностей, где состав и положения выбранных ключевых объектов отличаются от состава и положения объектов в обучающем кадре не более некоторого предела.

Построение карты осуществляется следующим образом. В начале работы первый поступивший кадр выбирается в качестве ключевого (опорного), обучается нейрон для его распознавания. Каждый последующий кадр проверяется на распознавание уже добавленными нейронами, и, если ни один из них не реагирует, добавляется в качестве нового ключевого, выращивается (добавляется) новый нейрон для его распознавания.

Описание набора данных

Для экспериментов было записано несколько последовательностей кадров в помещении. Для записи последовательности робот с камерой устанавливался в некоторое положение и совершал вращательные и поступательные движения. Для проведения экспериментов по локализации в двух точках было записано по две последовательности, где при записи второй последовательности менялся состав и положения объектов, а также ракурс камеры. Также во второй точке была записана тестовая последовательность, в которой запись велась с рук, а камера существенно смещалась относительно точек записи основной и тестовой последовательностей. Обозначим пары записей

в первой и второй точках как S_{11} и S_{12} для первой точки, S_{21} и S_{22} для второй точки, тестовую запись второй точки как S_{2T} . Общее число кадров каждой последовательности представлено в таблице 1.

Таблица 1

Набор кадров	Число кадров		
	общее	ключевые	тестовые
11	790	197	593
12	668	167	501
21	452	113	339
22	544	136	408
2T	1813	453	1360

Экспериментальное исследование

Экспериментальные исследования предлагаемого метода построения нейроморфной карты на сегментной спайковой модели нейрона с временным кодированием призваны показать принципиальную возможность построения карты M_S для любой заданной последовательности S . Также требуется экспериментально подтвердить возможность локализации кадров из последовательности S_2 в карте M_{S_1} для последовательности S_1 , если они наблюдают одинаковые области.

Для проведения экспериментов были построены нейроморфные представления всех кадров последовательностей $S_{11} \dots S_{2T}$ по описанному выше методу.

Деление кадра на большое число рецептивных полей по результатам предварительных тестов показало себя неэффективным. Вместо этого предложено правило выбора самого высокого (по вертикальной координате) объекта каждого класса в качестве опорного. Такая модификация позволила сократить число полей до трех, сохраняя высокую информативность кадра и устойчивую конфигурацию ориентиров.

Таким образом была сформирована конфигурация нейрона для распознавания, показанная на рис. 2. Всего 3 рецептивных поля по 8 классов на каждую, 24 информационных дендрита и один для синхронизирующего импульса.

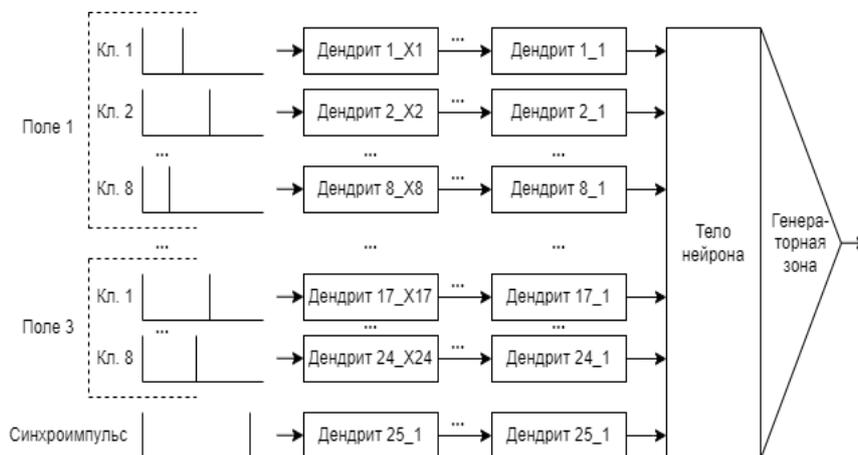


Рис. 2. Структура нейрона карты

	M_{11}	M_{12}	M_{21}	M_{22}
S_{11}	0,995	0,884	–	–
S_{12}	0,920	0,999	–	–
S_{21}	–	–	0,992	0,849
S_{22}	–	–	0,799	1,000
S_{2T}	–	–	0,638	0,475

Так как последовательное добавление нейронов в карту на практике сопряжено с сложностями в технической реализации, в качестве ключевых были использованы каждый четвертый по счету кадр последовательности (№ 0, 4, 8, ...), прочие в качестве тестовых. Их число представлено в таблице 1. В эксперименте по возможности описания набором нейронов последовательности выполнялось сопоставление всех кадров из последовательности с нейронами карты, построенной на ее основе, т. е. из S_{11} в карту $M_{S_{11}}$. В эксперименте по сопоставлению пар последовательностей выполнялось перекрестное сопоставление тестовых наборов, из S_{11} в $M_{S_{12}}$ и наоборот, из S_{21} в $M_{S_{22}}$ и наоборот, а также из S_{2T} в $M_{S_{21}}$ и $M_{S_{22}}$.

Для визуальной оценки сопоставления были построены карты ответов нейронов, которые представлены матрицами реакций. Вертикальный столбец описывает реакцию нейрона в области восприятия, светлая точка соответствует положительному ответу ($N_j(I_i) = 1$), темная – отрицательному ($N_j(I_i) = 0$). Пример матрицы, описывающей реакции из S_{11} в карту $M_{S_{11}}$ представлен на рис. 3.

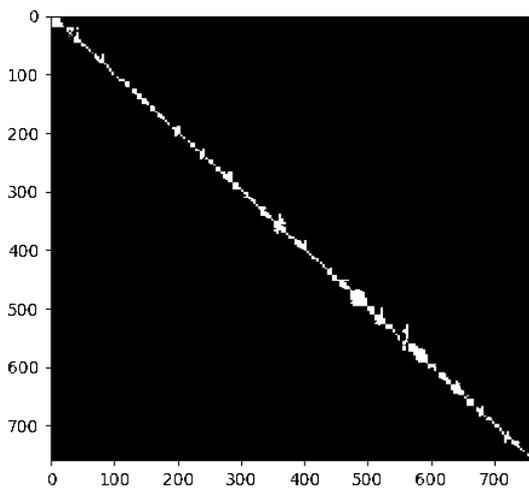


Рис. 3. Ответы нейронов $M_{S_{11}}$ на кадры S_{11}

Для численной оценки качества сопоставления были введены метрики качества локализации кадров последовательности в карте. При локализации, если кадр входит в поле карты, но на него не реагирует ни один нейрон карты, это пропуск (FN), ошибка 2 рода. Если нейрон реагирует на кадр и визуальная проверка подтверждает соответствие кадров, это правильное обнаружение (TP), если проверка не подтверждает соответствие кадров, это ложное обнаружение (FP), или ошибка 1 рода. На основе ручного расчета этих параметров рассчитаны метрики точности, полноты и F_1 -меры по формулам

$$P = \frac{TP}{TP + FP}, \quad R = \frac{TP}{TP + FN}, \quad F_1 = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}. \quad (2)$$

Интегральная метрика F_1 для всех пар последовательностей показана в таблице 2. Слева показаны номера последовательностей, сверху – карт, в которые они локализовывались.

Приведенные значения метрик в диагонали таблицы для сопоставления (S_{ij} - M_{ij}) показывают успешность предложенного подхода для описания последовательности в виде нейроморфной карты.

Показатели качества локализации также являются достаточно высокими. Толерантность нейрона к искажениям входных последовательностей в экспериментах была установлена достаточно низкой из расчета на оценку описания исходной последовательности. Эксперименты по подбору оптимальной величины порога для успешной локализации при различных величинах искажений выходят за рамки настоящего исследования.

Заключение и направление исследований

В работе предложен метод описания последовательностей изображений с наборами визуальных ориентиров с использованием растущей нейроморфной карты, формируемой из сегментных спайковых нейронов.

Экспериментальное исследование предложенного подхода показало высокое качество описания исходной последовательности изображений (показатель F_1 от 0,992 до 0,999). Также продемонстрирована устойчивость к изменениям положения камеры, положения и состава объектов (F_1 от 0,799 до 0,920 для разных пар) и даже к существенным перемещениям и колебаниям камеры относительно карты (0,475 и 0,638).

В дальнейшем предполагается рассмотреть иные уровни толерантности нейрона к колебаниям входных данных; другие подходы к кодированию, в том числе учет вертикальной координаты и иные способы деления кадра на рецептивные поля. Кроме того, планируется обобщить предлагаемый подход на систему кругового обзора с камерами типа «рыбий глаз» и иные физические принципы определения ориентиров и направлений на них.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России «Исследование методов анализа слабоструктурированных данных, обработки знаний и создания когнитивных агентов на базе комбинированных глубоких нейронных сетей» (FNRG-2025-0008 1024050200009-5-1.2.1;2.2.2).

Литература

1. Fox D., Burgard W., Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance // IEEE Robotics & Automation Magazine. 1997. V. 4, no. 1. С. 23–33.
2. Brock O., Khatib O. High-speed navigation using the global dynamic window approach // Proceedings 1999 IEEE international conference on robotics and automation (Cat. No. 99CH36288C). IEEE, 1999. V. 1. P. 341–346.

3. Klein G., Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces // 2007 6th IEEE and ACM international symposium on mixed and augmented reality. IEEE, 2007. P. 225–234.
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. 2017. V. 33, no. 5. P. 1255–1262.
5. Campos C. et al. Orb-slam3: An accurate open-source library for visual, visual–inertial, and multimap slam // IEEE transactions on robotics. 2021. V. 37, no. 6. P. 1874–1890.
6. Korsakov A.M. et al. Determination of an Unmanned Mobile Object Orientation by Natural Landmarks // AIST (Supplement). 2016. P. 91–101.
7. Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М. Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота: препринт Ин-та прикл. матем. им. М. В. Келдыша РАН. 2002. № 5. С. 40.
8. Tsintotas K.A., Bampis L., Gasteratos A. The revisiting problem in simultaneous localization and mapping: A survey on visual loop closure detection // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2022. V. 23, no. 11. P. 19929–19953.
9. Akcal U. et al. LoCS-Net: Localizing convolutional spiking neural network for fast visual place recognition // Frontiers in Neurobotics. 2025. V. 18. P. 1490267.
10. Xu Z. et al. Grid cell remapping under three-dimensional object and social landmarks detected by implantable microelectrode arrays for the medial entorhinal cortex // Microsystems & Nanoengineering. 2022. V. 8, no. 1. P. 104.
11. Бахшиев А.В., Демчева А.А. Сегментная спайковая модель нейрона // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях-2021. Труды VII Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2021. С. 26–29.
12. Корсаков А.М., Астапова 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.
13. Wang C.Y., Bochkovskiy A., Liao H.Y.M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2023. P. 7464–7475.
14. Ultralytics | Revolutionizing the World of Vision AI // URL: <https://www.ultralytics.com/> (дата обращения 02.05.2025).
15. Hopfield J.J. Pattern recognition computation using action potential timing for stimulus representation // Nature. 1995. V. 376, no. 6535. P. 33–36.

О понимании и моделировании полушарной асимметрии в живых и искусственных когнитивных системах (синергетический подход)

О.Д. Чернавская*, Н.Ш. Александрова

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва;
olgadmitcher@gmail.com
nina.alexandrova@gmx.net

1. Введение

Человеческий мозг разделен на два полушария – левое (ЛП) и правое (ПП). Почему? Различаются ли полушария морфологически и функционально? Общепринятой теории, объясняющей возникновение межполушарной асимметрии в фило- и онтогенезе, пока нет. Осмысление этого феномена имеет долгую историю; оно не закончено, дискуссии продолжаются [1–3].

Однако современные когнитивные архитектуры [4–6] строятся *без учета* роли полушарий. Они нацелены на решение *стандартных* задач человеческого мышления *лучше*, чем человек: более быстро, эффективно, оптимально.

Мы предлагаем подойти к проблеме асимметрии полушарий с позиций *синергетики* [7–9], т. е. объединить подходы нейробиологии, нейробиологии и моделирования когнитивных систем.

2. Данные нейробиологии

Нейробиология – наука, которая исследует связи структуры и функций мозга с психическими процессами и поведением. В рамках этой дисциплины накоплен материал о нарушениях познавательных процессов при различных поражениях мозга (работы Выготского [10], Лурия [11] и др.).

Осмысление межполушарной асимметрии проходит путь от представления «полушария обрабатывают разные *стимулы*» к пониманию, что дело не в стимулах, а в *способах* обработки: каждому полушарию свойственна своя специфическая *стратегия* обработки информации, и все когнитивные функции обеспечиваются *двойственным* процессом. Меняется представление роли полушарий: есть обоснованное предположение, что ПП, которое ранее считалось субдоминантным, является ведущим в деятельности мозга [12]. В настоящее время с большой долей уверенности можно утверждать, что мозг представляет собой единый парный орган, а деятельность каждого из полушарий имеет свою специфику и вносит свой особый вклад в осуществление любой психической функции. Нормальное функционирование мозга возможно лишь при взаимодействии полушарий.

Как известно, у взрослых людей право- и левосторонние поражения мозга стабильно приводят к разным синдромам, которые в нейробиологии известны как право- и левополушарные синдромы, т. е. межполушарная организация функций достаточно устойчива, она повторяется от человека к

человеку и от поколения к поколению. В то же время полушария и присущие им стратегии обработки информации не связаны абсолютно жестко: возможны перестройки при патологии, зеркальная организация функций у левшей.

Двойственность человеческого познания (рациональность и чувственность) отмечалась и античными мыслителями, и в наше время. Выготский [10] говорил о *спонтанных* (житейских) и *научных* понятиях; Леннеберг [13] говорил о дихотомии «*видоспецифичность / пластичность*» относительно двух способов освоения языка. Развивая подход, наметенный Леннебергом, мы приходим к пониманию, что человек обладает двумя типами навыков и знаний.

- *Видоспецифические* (видовые) поведенческие характеристики, навыки и знания, становление которых происходит как созревание в определенные природой сроки, – это способность воспринимать окружающий мир с помощью органов чувств, способность к ходьбе, пониманию и воспроизведению устной речи, способность непрерывно и произвольно оценивать окружающий мир и себя в этом мире и т. д. Навыки, приобретенные таким образом, не могут быть забыты / утрачены, их может нарушить только травма или болезнь, а нарушение ведет к той или иной степени инвалидизации.

- *Намеренное, целенаправленное* обучение. Так осваиваются профессиональные навыки, письменная речь, другой язык, управление автомобилем и т. д. Эти навыки, с одной стороны, могут быть автоматизированы (через многочисленные тренировки и репетиции) и применяться без участия сознания («на *автопилоте*»), но могут и забываться, если не используются регулярно (что, однако, не воспринимается как инвалидность). Эти навыки *необязательны* для здоровья человека, четких сроков их формирования в онтогенезе нет [14, 15].

Естественно предположить, что инструменты для реализации этих противоположных взаимодействующих способностей («стратегий») должны быть сосредоточены в двух разных полушариях. Причем первая «стратегия», как более древняя, должна уходить корнями в филогенез и быть связана с процессами в подкорковых структурах (древних механизмов, обеспечивающих гомеостаз). Вторая стратегия (осознанное обучение) должна относиться уже только к неокортексу как

наиболее «современному» (эволюционно) аппарату, присущему человеку. Именно к ней может иметь отношение «компьютерная метафора», т. е. представление о том, что работа мозга аналогична алгоритмам современных компьютеров.

3. Основные положения синергетики

Синергетический подход развивался в конце 80-х, в работах [7–9], для описания *многопараметрических* систем, где ключевым понятием стало слово «самоорганизация». В частности, была разработана динамическая теория информации (ДТИ) [9], на выводы которой мы будем опираться ниже.

Идеология синергетики основана на предположении о том, что Природа *экономна*: если какая-то схема однажды сработала удачно, она потом применяется в разных (и живых, и неживых) системах как «элемент конструктора» [16]. Приведем несколько основных постулатов синергетики, на которые мы будем опираться в дальнейшем...

П0. В онтогенезе реализуются *те же стадии*, которые были пройдены в филогенезе.

П1. Шум (случайная активация какого-либо элемента) – *универсальный инструмент* реакции системы на внезапно и непредсказуемо меняющиеся условия окружающей среды. Он всегда *энергозатрачен*, а результат *непредсказуем*.

Стандартное представление шума имеет вид: $Z(t) \cdot \xi(t)$, где $Z(t)$ – амплитуда шума, $0 < \xi(t) < 1$ – случайная функция.

П2. *Энергетические ресурсы* любой системы ограничены, так что их распределение должно быть рациональным (оптимальным).

П3. *Информация* – ключевой фактор в эволюции всех сложных развивающихся систем. Возникновение и эволюция информации – предмет ДТИ, которая опирается на определение Кастлера «*информация есть запомненный выбор одного варианта из многих равноправных*» [17]. Отсюда следует несколько важнейших выводов.

Существует два способа ее происхождения:

- *генерация*, т. е. *создание новой* информации – свободный *случайный* выбор благодаря шуму;

- *рецепция*, т. е. *получение* уже существующей информации извне, т. е. не *выбор*, а *отбор*.

Важно, что эти процессы *комплементарны* (дополнительны), откуда следует «*принцип разделения функций*»: любая развивающаяся система должна содержать *две разные подсистемы* для реализации этих способов. Согласно наблюдениям нейропсихолога-клинициста Голдберга, ПП отвечает за генерацию информации (первичное обучение, творчество), а ЛП – за рецепцию и консервацию [18].

Различают две разные *категории* информации:

- *Объективная* – выбор, сделанный Природой. Она экспериментально измерима и *достоверна* (воспроизводится при тех же условиях).

- *Условная / субъективная* информация – выбор, сделанный в некотором *коллективе* субъектов в результате *самоорганизованного* взаимодействия. «Субъективная» информация в традиционном смысле слова – это выбор, сделанный «коллективом» нейронов мозга данного *субъекта*; именно она определяет индивидуальность.

П4. Строение (конструкция) любой системы (и живой, и искусственной) определяется главной целью, с которой эта система была создана.

П5. Любая развивающаяся система должна содержать механизм *гомеостаза*, т. е. сохранения системы «как целого» в любых, в том числе внешне и непредсказуемо меняющихся условиях.

С позиций эволюции Природы главная цель любой живой системы – «выживание и экспансия». Для этой цели главными факторами являются:

- способность к *обучению* (пластичность);
- способность к *генерации* информации (шум);
- механизм регуляции (*гомеостаз*).

Механизм гомеостаза изменялся в процессе эволюции [19], но всегда был связан с подкорковыми структурами (Old Brain, Limbic Brain). При моделировании мышления учетом только процессов в неокортексе ограничиться невозможно; регуляторные функции, согласно «теории конструктора» [16], должны реализовываться через те же схемы, которые уже работали на этапах филогенеза, т. е. «эмоции» (в широком смысле слова).

С позиций синергетики, разделение мозга человека на две подсистемы необходимо сразу по нескольким причинам – и для достижения главной цели (П0, П4), и для реализации дихотомии «генерация / консервация» информации (П3), и для работы в двух режимах «штатные / катастрофические» условия (для экономии энергии П2, П5).

Что касается искусственных когнитивных систем, цель «выживание и экспансия» поставлена *быть не может*. Здесь цель – решать *стандартные* задачи мышления лучше, чем человек: более оптимально. Согласно П4 и П2, разделение на две подсистемы не представляется эффективным решением для искусственных когнитивных систем.

4. Моделирование роли полушарий

Модель Natural-Constructive Cognitive Architecture (NCCA), которую мы разрабатывали с 2013 года по настоящее время [20–22], имеет целью понять и воспроизвести особенности *именно человеческого мышления*. Она строится на основе известных нейро-процессоров и базируется на принципах синергетики. Система разделена на *две подсистемы*, ПП и ЛП. Напомним кратко основные принципы модели, акцентируя внимание на роли и функциях подсистем (уравнения не приводятся для краткости).

Схема на рис. 1 представляет многоуровневую иерархическую структуру нейронов *неокортекса*. *Гомеостаз* реализуется через *эмоции*, которые зарождаются вне неокортекса и регулируют активность подсистем ПП ↔ ЛП через связи $\Lambda(t)$ (детали см. в работе [22]). Амплитуда шума $Z(t)$ трактуется как «*эмоциональная температура*»,

че изменение соответствует *спонтанной оценке ситуации* («видовая» способность).

Уровни (слои) схемы – процессоры двух типов: Хопфилда [23] (распределенная память) и смешанного типа «квази-Гроссберга» [21, 24]

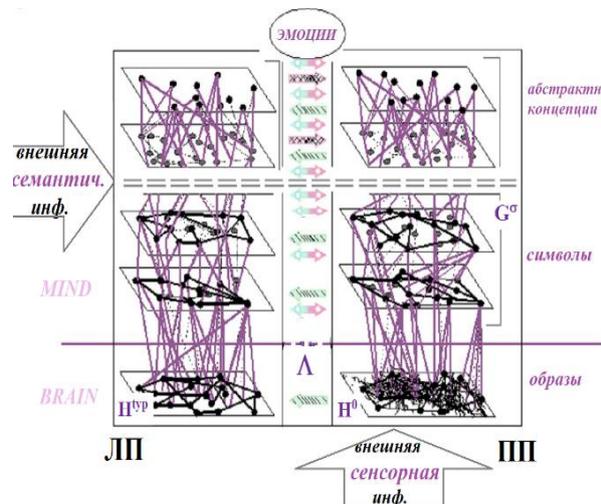


Рис. 1. Схема NCCA

(локализация образа и ассоциативная связь). Специализация подсистем обеспечивается двумя факторами:

- 1) шум $Z(t) \cdot \xi(t)$ присутствует *только* в ПП;
- 2) *разные* законы обучения связей $\Omega(t)$ между нейронами: хеббовский [25] закон усиления («почернения») связей в ПП и изначально-хопфилдовский [23] принцип «отсечения лишнего» в ЛП (см. рис. 2, верхняя часть).

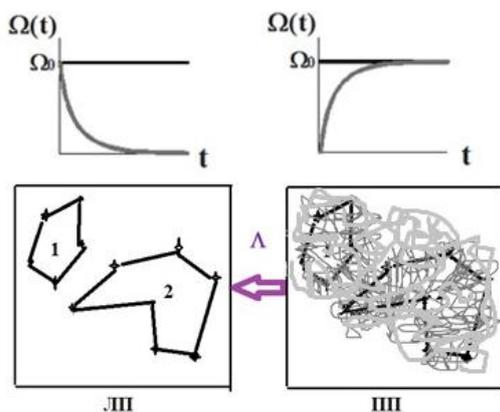


Рис. 2. Фрагмент нулевого уровня схемы для начала обучения (внизу) и динамика обучения связей (сверху) для ПП и ЛП

На начальном этапе работают только «видовые» способности в ПП: ребенок познает мир через сенсорные органы; *спонтанная* оценка ситуации «встреча с незнакомым объектом» повышает $Z(t)$, и на пластине H^0 формируется *цепочка нейронов*, далее называемая «образ» объекта. Связи между активными нейронами постепенно усиливаются («чернеют»). При этом некоторые нейроны горят постоянно – они соответствуют наиболее характерным правлениям объекта; мы назвали их «кор-нейроны» (они соответствуют «категориальным» признакам). Когда связи между ними

становятся сильными («черными»), ребенок ощущает объект как «знакомый» (эмоциональная температура $Z(t)$ *понижается*), информация о нем передается на тот же уровень ЛП на пластину *типичных* образов H^{TP} как четкий «каркас» («схема») образа (см. рис. 2, левая нижняя часть) и запоминается.

Те нейроны, которые соответствуют *нетипичным* чертам данного объекта (нестандартным и/или редким проявлениям), в процессе обучения активируются реже; мы назвали их «гало-нейронами». Связи между ними остаются относительно слабыми («серыми»), в результате чего на пластине H^0 образ предстает в виде *размытого пятна*, окружающего (и частично поглощающего) «каркас» (рис. 2, правая нижняя часть). Это пятно называется «серое гало». Именно эти серые связи порождают *неявные* (*implicit*) ассоциации, которые понятны только самой системе и никому другому (как между объектами 1 и 2 на рис. 2). Информация об этих связях, как «неважная», остается *только* на этой пластине и не передается далее ни в ЛП, ни на следующий (символьный) уровень. Это – «скрытая» («латентная») информация системы, она может интерпретироваться как *подсознание*.

Далее, «знакомый» образ передается на следующий уровень ПП, где происходит выбор *символа* (снова благодаря шуму) – остается один нейрон-победитель. Это значит, что ребенок дает объекту свое (внутреннее) *имя*; эта информация передается на соответствующий уровень ЛП и запоминается.

Далее, символы получают возможность участвовать в *кооперативном* (хеббовском) взаимодействии и начинают сами создавать «обобщенные» образы («образ из символов»), которые со временем получают свой символ на следующем уровне, и т. д. Подчеркнем, что триада «объект-образ-символ» является основным актом узнавания окружающего мира в ПП, «атомом сознания». Она появляется на всех уровнях иерархии, причем «объектом» считается образ на предыдущем уровне (предмет → явление → процесс → концепция). В физике такие системы называются *фракталами*.

На этом этапе ПП выступает как «учитель» для ЛП, поставляя *уже проанализированную* информацию; ЛП выступает как *ведомое*.

На средних уровнях система приобретает *язык*, т. е. доступ к *семантической информации* *извне*. Этот процесс требует специального обсуждения.

Рассмотрим роли ПП и ЛП в хорошо обученной системе, что соответствует взрослому мозгу.

- ПП содержит *целостную* информацию о всех объектах/явлениях/процессах, с которыми человек сталкивался на собственном опыте (*эпизодическая* память). Она включает в себя и *типичные* образы на каждом уровне иерархии (переданные для запоминания в ЛП), и, казалось бы, неважную информацию (гало-нейроны вместе с их серыми связями, которых нет в ЛП). Такие «серые» связи возникают *на всех иерархических уров-*

нях (не только на нулевом), порождая индивидуальные (implicit) ассоциации между галосимволами любого уровня, что проявляется как «интуиция».

• ЛП содержит «типичные образы» объектов/явлений/процессов, выученных в ПП, вместе с запомненными алгоритмами их обработки. Кроме этого, ЛП содержит огромный массив семантической информации, полученной извне (из книг и учебников, от учителей и т. д.) в уже готовом (символьном) виде, при осознанном освоении письменной речи и намеренном обучении.

Большинство повседневных задач решаются в ЛП путем последовательного анализа типичных образов и ассоциативных («объективных», причинно-следственных) связей между ними, т. е. «логическим» путем. Если ЛП испытывает затруднение, то система должна обратиться к ПП, где проблема решается интуитивно, т. е. при помощи неявных индивидуальных (implicit) ассоциаций и общего восприятия («синтеза») ситуации.

Таким образом, в обученной системе, соответствующей мозгу взрослого человека, ЛП становится доминантным полушарием, а ПП должно активироваться лишь в нестандартных ситуациях. Впрочем, в реальности ПП включается довольно часто, несмотря на энергетические затраты.

5. Дискуссия и выводы

Показано, что с единой («синергетической») позиции полушарная специализация необходима.

ПП необходимо для реализации видоспецифических («геномных») функций. Здесь работает более древний (эволюционно), произвольный способ общения с окружающим миром – общая (интуитивная) оценка. Оно активируется в непредсказуемых (катастрофических) ситуациях, когда требуется быстрая (без раздумий) реакция.

Отметим, что в модели НССА понятие интуиция теряет свой «мистический ореол» и обретает «субстрат» в виде слабых (серых) связей между гало-нейронами, которые существуют только в ПП («неформализованный индивидуальный опыт»).

ЛП необходимо для адаптации к условиям данного конкретного социума: реализации вербальной коммуникации, приобретению негеномных навыков (профессиональных, спортивных и т. д.), накоплению большого количества типичных ситуаций и отработанных алгоритмов реагирования, что существенно экономит энергию. Оно должно доминировать в стандартных (штатных) ситуациях. Поскольку в обычной жизни «катастроф» не так много, ЛП может считаться доминантным полушарием.

В рамках модели НССА эта специализация естественно воспроизводится путем всего лишь двух предположений – присутствием шума (порожденного регуляторными подкорковыми структурами) только в ПП и разными законами обучения связей нейронов неокортекса.

При этом и в жизни, и в модели для нормальной работы системы необходимо взаимодействие (симбиоз) двух полушарий.

Таким образом, наши выводы практически согласуются с «фольклорной» интерпретацией роли полушарий. Исключение составляет гендерный аспект: интуиция традиционно считается прерогативой женщин, а логика – мужчин. В модели НССА этого нет, но данный аспект заслуживает специального отдельного обсуждения.

Существует теория, что гендерный аспект возникает в филогенезе: мужчины играют роль ПП (поиск новых решений, риск, прогресс), а женщины исполняют функции ЛП (запоминание и хранение удачных решений) [26]. Такая «асинхронная эволюция» отражает известную дихотомию «сохранение вида / прогресс». Почему это не проявляется в онтогенезе, мы пока не понимаем.

Литература

1. Джексон Дж. О природе двойственности мозга // Нейропсихология: хрестоматия, 3-е изд. / под ред. Е.Д. Хомской. СПб. : Питер, 2011.
2. Величковский Б.М. Когнитивная наука. Основы психологии познания: учебник в 2 т., 2017.
3. Ocklenburg S., Guo Z.V. Cross-hemispheric communication: Insights on lateralized brain functions // Neuron. 2024. V. 112(8). P. 1222–1234.
4. Laird J.E. The Soar Cognitive Architecture. MIT Press, 2012.
5. Samsonovich A. Emotional biologically inspired cognitive architecture // BICA. 2013. V. 6. P. 109–125.
6. Яхно В.Г. Достижения и проблемы в использовании концептуальных моделей мозга // Труды V всероссийской конф. «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». Н. Новгород : ИПФ РАН, 2017. С. 266–269.
7. Prigogine I., Nicolis G. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. Wiley, 1977.
8. Haken H. Information and Self-Organization: A macroscopic approach to complex systems. Springer, Heidelberg, 2000.
9. Чернавский Д.С. Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М. : УРСС, 2009.
10. Выготский Л.С. Мышление и речь. М.-Л. : Гос. социально-экономическое издательство, 1934. 362 с.
11. Лурия А.Р. Мозг человека и психические процессы: в 2 т. М. : Педагогика, 1970.
12. McGilchrist I. The Master and His Emissary: The Divided Brain and the Making of the Western World. New Haven: Yale University Press, 2009. 608 p.
13. Lenneberg E.H. Biologische Grundlagen der Sprache. Frankfurt am Main : Suhrkamp, 1972. 597 p.
14. Александрова Н.Ш. «Метафора компьютера», межполушарная асимметрия и видовое (спонтанное) знание Homo sapiens // ПНД. 2022. Т. 30(3). С. 358–372.
15. Александрова Н.Ш. О понимании речи человеком. В поисках «конструкторских» идей природы // Язык и искусственный интеллект: сб. статей конференции «Лингвистический форум-2020: язык и искусственный интеллект». DOI: 10.37892/978-5-907498-47-1-1.
16. Egami F. New Horizons in Biological Chemistry. Tokyo: Scientific Society Press, 1978.
17. Quastler H. The emergence of biological organization. Yale University Press, NH, 1964.

18. *Goldberg E.* The New Executive Brain. Oxford University Press, 2009.
19. *Panksepp J., Biven L.* The Archaeology of Mind: Neuro-evolutionary Origins of Human Emotions. Norton, N. Y., 2012.
20. *Chernavskaya O.D. et al.* An architecture of thinking system within the Dynamical Theory of Information // *BICA*. 2013. V. 6. P. 147–158.
21. *Chernavskaya O., Rozhlyo Ya.* On Modeling the Creativity and the Concept of Chef-D'oeuvre // *Cognitive System Research*. 2021. V. 68. P. 18–33.
22. *Chernavskaya O.* To the problem of Digital Immortality // *Cognitive System Research*. 2024. V. 88. P. 101303.
23. *Hopfield J.J.* Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // *PNAS*. 1982. V. 79. P. 2554–2558.
24. *Grossberg S.* Studies of Mind and Brain. Riedel (ed). Boston, 1982.
25. *Hebb D.O.* The Organization of Behavior: Neuro-psychological Theory. Wiley & Sons, 1949.
26. *Геодакян В.А.* Эволюционные теории асимметрии организмов, мозга и тела // *Успехи физиологических наук*. 2005. Т. 36, вып. 1. С. 24–53.

Биомашсистемы для ветеринарии и медицины

В.И. Черноиванов, Г.К. Толоконников

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ;
admcit@mail.ru

Рассматриваются медицинские и ветеринарные биомашсистемы с расширенным системообразующим фактором, ставится задача использования данного системообразующего фактора в развитии теории функциональных систем в рамках предложенного проекта «Биомашсистемы для физиологии».

Системообразующий фактор в теории функциональных и биомашсистем

В основе биомашсистем, теория которых развивается авторами [1, 2], лежит триада «человек – машина – продуктивное живое». В системном движении, насчитывающем многие десятки системных подходов, биомашсистемы являются новым, ранее до авторов не изучавшимся видом систем, как это показано с философской, логической и математической точек зрения в работе [2], при этом были использованы лежащие в основе формализации биомашсистем разделы категорной математики [3]. Под продуктивным живым понимаются, в частности, культурные растения, сельскохозяйственные животные и биомассы, которые подвергаются воздействию других подсистем для реализации системообразующего фактора биомашсистемы: получения сельскохозяйственной продукции запланированного качества и количества. Однако уже в биомашсистемах возникают задачи, связанные с работой с недостаточно здоровыми животными и растениями, с требованиями к рабочему состоянию оператора машины и его здоровью. Необходимы системы с системообразующим фактором обеспечения достижения ветеринарных и медицинских целей излечения или поддержания на нужном уровне здоровья живых объектов биомашсистемы.

Такие системы не являются биомашсистемами, но, с одной стороны, они необходимы для более эффективного функционирования биомашсистем, а с другой стороны, по своей структуре и параметрам они мало чем отличаются от биомашсистем. Во-первых, они также определяются подходящей весьма близкой к биомашсистемам триадой «человек – машина – живое», в которой «живое» для медицинского случая есть пациент или человек, для которого необходимо изменить уровень его здоровья, а для ветеринарного (сюда же можно отнести проблематику болезней культурных растений) случая «живое» есть животное, для которого необходимо устранить имеющиеся проблемы со здоровьем. Такие системы наряду с обычными биомашсистемами мы будем называть *расширенными биомашсистемами*, а сами подобные системы – биомашсистемами для медицины и ветеринарии или медицинскими (ветеринарными) биомашсистемами. Для определенности будем

далее говорить о медицинских биомашсистемах или, короче, о медбиомашсистемах. Весьма много из общей теории биомашсистем проходит и для медбиомашсистем, рассмотрению этого вопроса посвящены отдельные работы, здесь мы рассматриваем вытекающие из теории биомашсистем фундаментальные вопросы для физиологии, патофизиологии и традиционной теории функциональных систем.

Биомашсистема содержит функциональные системы [4, 5], реализованные в ее подсистемах «человек» и «живое», при этом теория функциональных систем используется, но *не является предметом исследования*. В медбиомашсистемах ситуация кардинально в этом вопросе меняется, под прицелом оказывается описываемый теорией функциональных систем объект, на который направлены усилия других подсистем, при этом выявляются недоработки в теории функциональных систем, которые ограничивают на практике эффективность функционирования медбиомашсистемы. Мы рассмотрим два принципиальных вопроса требуемого для медбиомашсистем развития функциональных систем: необходимость расширения понятия системообразующего фактора, что имеет место в теории биомашсистем и снятие принципиального для теории функциональных систем ограничения в виде требования полезности результата как обязательного атрибута системообразующего фактора [4, 5]. Обе указанные позиции необходимо пересмотреть именно для теории функциональных систем, чтобы снять ограничения повышения эффективности медбиомашсистемы. Для подобного пересмотра по указанным позициям достаточно перенести имеющееся понятие системообразующего фактора из теории биомашсистем в теорию функциональных систем. Развитие теории функциональных систем идет по многим направлениям, но здесь мы ограничимся указанными позициями.

В наиболее зрелой работе по теории функциональных систем П.К. Анохин [4] обосновал положение о том, что неживые системные образования, машины, динамические системы в механике и тому подобное не являются системами, поскольку для них, по его мнению, отсутствует системообразующий фактор как главный атрибут системы. В биомашсистемах используется расширенное понятие системообразующего фактора, которое предлагается перенести в физиологию, описываемую функциональными системами [5] (другие подходы к физиологии мы не рассматриваем). Естественность используемого в биомашсистемах (и медбиомашсистемах) понятия системообразующего фактора можно проиллюстрировать следующим рассуждением. Объектом воздействия медбиомашсистемы является организм человека

(пациент, оператор машины). Пусть ведущая в данный момент функциональная система имеет системообразующим фактором, для определенности, утоление жажды (точнее, поступление в кровь необходимого количества воды) с программой действий «подойти к холодильнику за водой». Фиксируем момент времени и, соответственно, положение организма и задаемся обычным в физике вопросом: как и куда переместится организм в следующий (близкий) момент времени? Хотя физиологи отвечают на вопрос так: «организм будет ближе к холодильнику», – они, как правило, не делают заключения о том, что динамикой движений организма (и, конечно, динамикой внутренних параметров и процессов, связанных с имеющимся системообразующим фактором) управляет именно системообразующий фактор. Анализ других примеров подтверждает (но, конечно, не доказывает) истинность высказывания: *«Движение, изменение, эволюцию... организма на заданном интервале времени определяет системообразующий фактор доминирующей в это время функциональной системы»*. Теперь рассмотрим для простоты «систему» нескольких материальных точек в механике Ньютона, фиксируем момент времени, задаем тот же вопрос, где будут точки в следующий близкий момент времени, и нам механика ответит так. Механическая система имеет постулатом принцип наименьшего действия, из него мы получаем уравнения движения, из решений получаем ответ на вопрос. Итак, *управляет движением частиц (механической «системы») принцип наименьшего действия* (кстати, как и во всей фундаментальной физике, вплоть до теории элементарных частиц и гравитации). И так, роль определения динамики здесь играет принцип наименьшего действия вместо системообразующего фактора. Это не просто аналогия по очевидной причине того, что организм сам состоит из механических частиц и *не может не подчиняться* принципу наименьшего действия. Но если этот принцип участвует в работе системообразующего фактора, то почему это не учтено в теории функциональных систем? Мы постулируем, что в системообразующий фактор функциональной системы входит принцип наименьшего действия. И это не простое «объединение», поскольку мозг управляет механической частью организма, то обычные законы механики неприменимы, но для такого случая есть весьма детально разработанный математический аппарат механики с сервосвязями, развиваемый в наше время школой академика В.В. Козлова.

При таком решении (детали см. в работах [2, 3]) механическая часть организма занимает свое адекватное место в физиологии, а неживые системные объекты типа «системы материальных точек» и тому подобное становятся полноправными системами по П.К. Анохину, получив свой системообразующий фактор.

Приняв такой вариант системообразующего фактора, мы автоматически снимаем вопрос о «полезности» результата, что тоже естественно, ибо организм (например, наркомана) благополучно движется не только к полезному результату,

а «полезность» для неживых систем теряет обычный смысл. Более того, к полноценным системам можно уже относить интуитивные представления Г.Н. Крыжановского [6] о патологических системах, его подходы к патофизиологии и теоретической медицине, что очень важно для медбиомашин с больными пациентами.

Проект «Биомашсистемы для физиологии»

Предыдущее изложение инициирует в практической плоскости реализацию проекта, направленного, помимо теоретических разработок, на обеспечение эффективного функционирования медицинских и ветеринарных биомашин. В докладе предполагается обсуждение перспектив возможно проекта «Биомашсистемы для физиологии».

Школой П.К. Анохина и К.В. Судакова проделана колоссальная работа по переводу физиологии с органного подхода на системный подход теории функциональных систем [5]. Указанное выше расширение понятия системообразующего фактора как требование практической реализации медбиомашин ставит задачу учета такого расширения при построении функциональных систем организма, а также применения на практике обновляемого и развиваемого таким образом системного подхода в физиологии, медицине и ветеринарии. Конкретной реализацией теоретической части проекта является разработка обновленной указанным образом теории функциональных систем, подготовка и издание выпусков обновленного варианта монографии [5], в которых также отражаются осуществляемые в проекте практические применения медицинских и ветеринарных биомашин.

На конференции в Красновидове 29–30 августа 2024 года было сформировано «Общество функциональных систем» ученых и медиков, использующих в своей работе функциональные системы и системный подход. Общество работает под эгидой Российской инженерной академии и ее секции «Системный подход и интеллектуальный интеллект». Коллектив общества может составить ядро специалистов проекта «Биомашсистемы для физиологии».

Литература

1. Черноиванов В.И. Биомашсистемы: возникновение, развитие и перспективы // Биомашсистемы. 2017. Т. 1, № 1. С. 7–58.
2. Черноиванов В.И., Толоконников Г.К. Основы теории биомашин. М. : Росинформротех, 2024. 303 с.
3. Толоконников Г.К. Категорные склейки, категорные системы и их приложения в алгебраической биологии // Биомашсистемы. 2021. Т. 5, № 1. С. 148–235.
4. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем // Принципы системной организации функций. М. : Наука, 1973. С. 5–61.
5. Нормальная физиология. Курс физиологии функциональных систем / под ред. К.В. Судакова. М. : Медицинское информационное агентство, 1999. 718 с.
6. Крыжановский Г.Н. Основы общей патофизиологии. М. : Медицинское информационное агентство, 2011. 256 с.

Анализ принципов моделирования биологических цифровых информационных молекулярных машин

В.А. Шевырина, Е.Д. Сорокоумов, А.Л. Проскура, А.С. Ратушняк

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск;
ratushniak.alex@gmail.com

В работе рассматриваются принципиальные ограничения и возможные подходы к исследованию работы биологических информационных систем. Проведен анализ проблем как экспериментального, так и имитационного моделирования цифровых информационных молекулярных машин, которыми, по существу, и являются биосистемы.

Введение

В нейросетевой парадигме функций мозга предполагается, что основными единицами обработки информации являются нейроны и их синаптические связи. При этом постулируется, что функция этих базовых элементов сводится к роли ключей – приему, переключению и передаче сигналов. Однако нейроны и синапсы чрезвычайно сложны и более похожи не на переключатели и мемристоры, а на молекулярные информационные машины. Нейроны и другие эукариотические клетки содержат высокоупорядоченные параллельные молекулярные сети [1]. Для определения базовых функций и механизмов их осуществления эти сети изучены недостаточно. Проблемы, связанные с анализом функции биологических информационных молекулярных систем, привели к множественным попыткам создания их концептуальных, феноменологических и имитационных моделей ([2, 3] и др.) Однако в большинстве из них не учитывалась по сути цифровая организация таких систем. Молекулы, работающие как элементы этих машин, могут существовать в предельно ограниченном количестве состояний, т. е. по существу обладать свойствами более приближенными к небинарным, чем к аналоговым элементам. Соответственно, моделирование таких молекулярных устройств продуктивно вести с использованием математического аппарата дискретной математики (логические модели, вероятностные булевы сети, сети Петри, цепи Маркова, агентные модели и др.).

Анализ функции и создание имитационных моделей межклеточных контактов и клеток мозга является актуальной задачей. Ее решение позволит продвинуться как в разработках технических когнитивных систем, так и в диагностике, профилактике и коррекции нарушений в работе биологических систем.

Однако на пути к решению задачи создания модели даже самых простых биологических систем возникает ряд трудностей, связанных как с их принципиально неупрощаемой сложностью, так и с недостаточностью данных о динамике взаимодействия молекулярных элементов их составляющих. Внутренняя молекулярная машина синапса, со-

стоящая из более чем тысячи различных взаимодействующих молекул, не может быть смоделирована без существенных упрощений. А такие упрощения ведут к получению недостаточно функционально и прогностически валидных результатов, как правило.

Экспериментальный анализ, необходимый для получения данных, нужных для имитационного моделирования биомашин, существенно ограничен в силу множества нерешенных проблем. Практически отсутствуют разработанные методы и технологии информационного взаимодействия с наноразмерными молекулярными машинами.

Применение молекулярных зондов, взаимодействующих с определенными молекулярными информационными цепями, достаточно ограничено в силу относительно небольшого набора таких зондов, проблем их локальной доставки к определенным элементам биосети и зачастую их недостаточной избирательности.

Представляется перспективным не проведение анализа существующих (даже простейших) биоинформационных систем, а моделирование фундаментальных основ их возникновения и эволюции [4, 5].

В данной работе предпринята попытка такого моделирования и экспериментальных исследований возможности получения подтверждений выдвигаемых предположений.

Результаты

Для экспериментальной проверки некоторых гипотетических предположений проведены экспериментальные исследования возможности нейронов запоминать и использовать ассоциативные (корреляционные или причинно-следственные) связи при внешних воздействиях.

В биофизических исследованиях молекулярных информационных систем большое значение имеет выбор экспериментальных моделей. В данной работе в качестве модели использовались изолированные нейроны и реконструированные *in vitro* нейронные сети. Такая модель позволяет создавать на отдельных участках клетки зоны пластичности и инструментально регистрировать изменения, происходящие в процессе выработки нейрональных реакций.

Работа проведена на культивируемых нейронах *Lymnaea stagnalis* (возраст 0,5–1,5 года), изолированных при помощи ферментативной обработки. На нейроне организовывалось несколько информационных входов и проводились ассоциированные воздействия (рис. 1). Для формирования

пластических реакций использовалась электро-стимуляция участков мембраны (8–10 мкм) или электрические и химические воздействия на локальную зону мембраны нейрона. При этом вначале формировался стимул, вызывающий только колебания мембранного потенциала, а затем стимул, вызывающий генерацию клеткой потенциала действия.



Рис. 1. Моделирование информационных входов на нейроне *Lymnaea stagnalis* в культуре ткани. Микропипетки, моделирующие информационные входы

Критерием выработки служило появление, после ряда ассоциированных воздействий, ответов на стимул, исходно не вызывавший генерацию потенциалов действия, и сохранение этих ответов несколько минут (рис. 2).

Для продвижения к пониманию молекулярных механизмов информационных процессов в клетке при ассоциированных воздействиях проводилась модификация отдельных молекулярных ансамблей в этих зонах. Это позволило модулировать время развития и сохранения достигнутого уровня реакции. В выбранной модели локально изменяли состояние цитоскелета, не нарушая его функции по всему объему клетки. Регистрировались ионные токи всей клетки и на нескольких участках

мембраны, конфигурация whole-cell и loose patch-clamp и оптические характеристики исследуемых зон нейрона.

Ранее нами было показано, что нарушения динамических перестроек цитоскелета, вызванные экзогенными лигандами актина и тубулина, оказывают влияние на реализацию, сохранение и повторную выработку пластических реакций [7, 8]. Эти данные подтвердили предположение, что исходное состояние и структурные перестройки актинового цитоскелета, обусловленные активностью белков, модулирующих эти процессы, могут оказывать влияние на пластические свойства клетки. Можно предположить, что первой реакцией клетки на воздействие может быть нарушение связей мембранных структур с кортикальным актиновым цитоскелетом. Это, не изменяя активности отдельных молекул, приводит к изменению ответов. Нарушение связи ионных каналов с цитоскелетом проявляется как уменьшение трансмембранных ионных токов нейронов, без изменения активности отдельных каналов, проводящих эти ионы.

Для проверки таких предположений структуры цитоскелета модифицировались гелсолином – белком, активируемым ионами кальция и модулирующим разборку актиновых нитей цитоскелета.

Гелсолин вызывал значительное уменьшение входящих ионных токов и подавлял развитие реакции привыкания на электрическую стимуляцию (рис. 3). Таким образом, было показано, что реакция клетки на внешний сигнал может зависеть не только от характера сигнала, но и от состояния кортикального актинового цитоскелета зоны воздействия, т. е. от пространственной локализации молекулярных структур на этом участке нейрона.

Эти данные подтверждают предположение, что белки, модулирующие динамическую подвижность цитоскелета и активируемые вторичными посредниками, могут принимать участие в трансляции информации об экстраклеточной среде в микроизменениях молекулярной машины нейрона и таким образом обуславливать специфику пластических реакций.

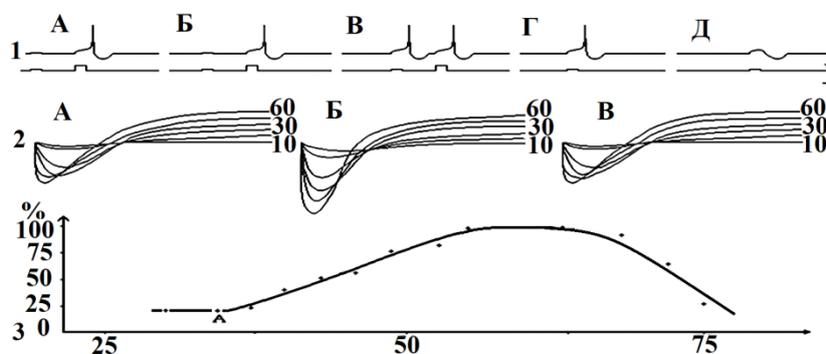


Рис. 2. Выработка реакции нейрона на ассоциированный стимул. 1. Верхний график (1) – мембранный потенциал клетки K1, нижний график – стимулы через P1 и P2, 1А – ответ на первое предъявление ассоциированного подпорогового и надпорогового стимулов; 1Б – после 5 сочетаний стимулов; 1В – после 50 сочетаний стимулов; 1Г – ответ на условный, ранее неэффективный стимул; 1Д – через 75 стимулов. 2А – трансмембранные ионные токи в начале стимуляции; 2Б – токи на этапе появления ответов на ранее неэффективный стимул; 2В – токи при стабильном ответе на первый стимул. 3 – усредненная кривая ответов на исходно неэффективный стимул. Калибровки 10 мВ и 3 мс

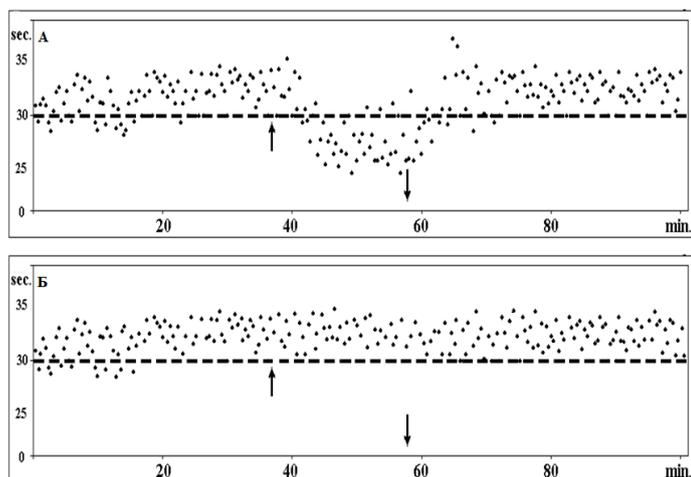


Рис. 3. Примеры динамики формирования пластической реакции изолированных нейронов: А – при автоподкреплении «длинных» межимпульсных интервалов; Б – при локальном действии гелсолина

Имитационное моделирование биосистем

С целью изучения принципов и молекулярных механизмов функционирования синапсов и разработки модели информационных процессов предприняты попытки моделирования возможных элементов молекулярных систем синапса и экспериментальный анализ модификации весов отдельных модельных входов клетки.

При создании имитационных моделей молекулярных машин синапса исходили из предположения, что на начальном этапе возникновения и эволюции биосистем самосборкой могли формироваться достаточно простые молекулярные

конструкции. Из таких по сути цифровых логических устройств в дальнейшем собирались системы, способные рецептировать внешние воздействия, обрабатывать и использовать обнаруженные и зафиксированные ассоциативные связи для обеспечения сохранения устойчивости системы в дальнейшем. Можно предположить, что в межклеточных контактах такие молекулярные машины определяющие взаимосвязи внешних медиаторных и других сигналов, играют ключевую роль. Для проверки предположения о роли запоминания ассоциативных воздействий в увеличении устойчивости системы разработана модель простейшего биоагента, например, [6] (рис. 4).

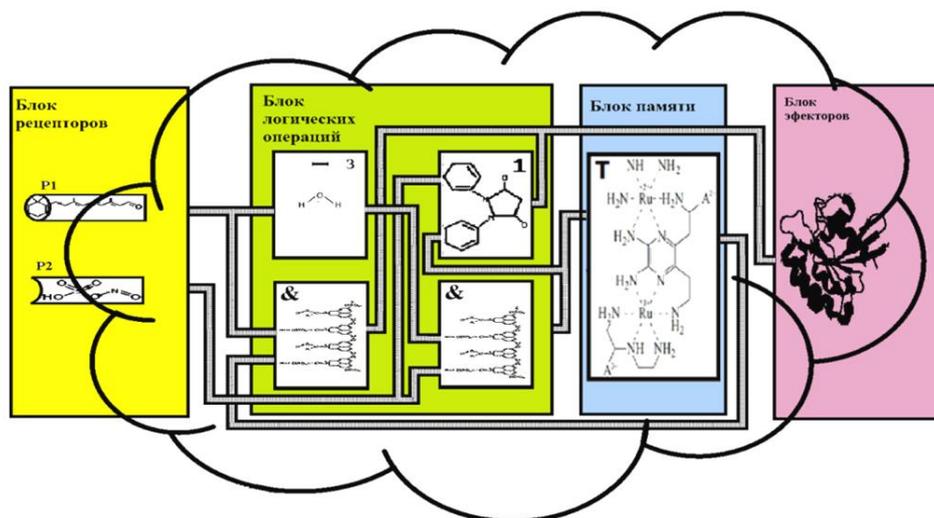


Рис. 4. Вариант эскизной схемы протобиологического агента (коацервата) с элементами молекулярных структур, выполняющих логические операции. Агент состоит из рецепторного блока (R1, R2), блока логических операций и памяти (элементы логики – & («И»), 1 («ИЛИ»), 3 – задержка, Т – триггер – элемент памяти) и эффекторов – Э)

Заключение

Полученные и литературные данные позволяют предположить, что основной функцией синапса (кроме восприятия и передачи информационного сигнала) является, как и у клетки в целом, логический анализ комплекса входных сигналов,

запоминание ассоциации нескольких (медиаторных и иных) сигналов и формирование реакции с учетом значимости поступающей информации для сохранения гомеостаза. Такие реакции осуществляются молекулярной машиной синапса с непосредственным участием цитоскелета. Выска-

занные предположения, естественно нуждаются в дальнейшей теоретико-экспериментальной проверке. В работе использованы ранее опубликованные материалы, например, [9–11].

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Литература

1. *Rasmussen S., Hameroff S. et al.* Computational connectionism within neurons: A model of cytoskeletal automata subserving neural networks // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. June 1990. V. 42, iss. 1–3. P. 428–449.
2. *Singharoy A., Maffeo C., Delgado-Magnero K.H. et al.* Atoms to Phenotypes: Molecular Design Principles of Cellular Energy Metabolism // *Cell*. 2019. V. 179, iss. 5. P. 1098–1111. Published in issue: November 14, doi.10.1016/j.cell.2019.10.021.
3. *Fuster J.M.* Cortex and Memory: Emergence of a New Paradigm // *J. Cognitive Neurosci*. 2009. 21. P. 2047–2072.
4. *Thornburg Z.R., Bianchi D.M., Brier T.A. et al.* Fundamental behaviors emerge from simulations of a living minimal cell // *Cell*. 2022. V. 185, iss. 2. P. 345–360. Published in issue: January 20, 2022, doi.10.1016/j.cell.2021.12.025.
5. *Nakajima T.* Biologically inspired information theory: Adaptation through construction of external reality models by living systems // *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 2015;119(3):634–648.
6. *Marijuán P.C., Navarro J., del Moral R.* How the living is in the world: An inquiry into the informational choreographies of life // *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 2015;119(3):469–480.
7. *Ратушняк А.С., Проскура А.Л., Шевырина В.А.* Моделирование формирования протобиологических молекулярных функциональных систем // XXVI Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2024»: сборник научных трудов. М. : МФТИ, 2024. 258 с. С. 213–220.
8. *Запара Т.А., Симонова О.Г., Жарких А.А., Ратушняк А.С.* Влияние динамического состояния цитоскелета на пластичность нейронов // *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 1999. Янв.; 85(1):128–38.
9. *Ратушняк А.С., Запара Т.А., Жарких А.А., Ратушняк О.А.* Влияние изменений динамического равновесия в системах микротрубочек и микрофиламентов на пластические реакции нейронов // *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*. 1996. 46(2):355–62.
10. *Proskura A.L., Vechkapova S.O., Ratushnyak A.S.* Dopamine and hippocampal synaptic plasticity // *Procedia Computer Science*. 2020. V. 169. P. 668–672.
11. *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. V. 1064. P. 231–237.

Микроструктура и фазовые превращения воды и водных растворов по данным оптической и сканирующей электронной микроскопии

Т.А. Яхно, В.Г. Яхно

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород;
yakhta13@gmail.com; yakhno@ipfran.ru

В докладе на основании собственных исследований и данных литературы излагается авторская концепция структуры и динамики воды на микроуровне с учетом ее микродисперсного строения [1–11]. Показано, что вода любой степени очистки содержит дисперсную фазу, каждый элемент которой представляет собой микрокристалл хлорида натрия, окруженный жидкокристаллической гидратной оболочкой (EZ), изолирующей соль от окружающей свободной воды. При испарении воды с гидрофильной (стеклянной) поверхности при комнатных условиях фракция свободной воды уходит в паровую фазу, а дисперсная фаза, оставаясь на дне посуды, превращается в гель, содержащий кристаллы соли (NaCl). Предложен механизм наблюдаемых фазовых превращений [9, 10].

В рамках принятой авторами концепции получено логичное объяснение феномена «активации воды» с помощью воздействия на нее различных факторов физической природы [5, 8]. Этот феномен носит неспецифический характер и обусловлен разрушением (диссоциацией) агрегатов дисперсной фазы, что сопровождается повышением «площади межфазной поверхности» в растворе [12]. Анализ литературы показал, что внешние энергетические воздействия любой природы на водопроводную, дистиллированную, бидистиллированную и деионизированную воду приводят к однонаправленным изменениям: снижению емкости, вязкости, поверхностного натяжения, окислительно-восстановительного потенциала, увеличению pH и электропроводности, что в целом улучшает усвоение такой воды растениями и животными. Релаксация изменений занимает часы (дни) после воздействия.

Показано, что в коллоидных жидкостях (на примере растворимого кофе) существуют автономные окологосударственные колебания поверхностного натяжения. Параметры колебаний зависят от концентрации коллоидной фазы и не зависят от внешних воздействий [6]. Предложена физика процессов, сформулированная в математической модели [7].

Авторы надеются привлечь внимание коллег к этой интригующей теме и начать полноценное сотрудничество.

Литература

1. *Yakhno T., Yakhno V.* A study of structural organization of water and aqueous solutions by means of optical microscopy // *Crystals*. 2019. 9(1). 52. DOI:10.3390/cryst9010052. <http://www.mdpi.com/2073-4352/9/1/52> 17.
2. *Yakhno T., Drozdov M., Yakhno V.* Giant Water Clusters: Where Are They From? // *Int. J. Mol. Sci.* 2019. 20. 1582. doi:10.3390/ijms20071582. <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/7/1582>
3. *Яхно Т.А., Яхно В.Г.* Физико-химическая эволюция дисперсной фазы воды при ее высыхании // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2019. Т. 4, № 1. С. 9–16.
4. *Яхно Т.А., Богданов С.А., Санин А.Г., Яхно В.Г.* Электронная микроскопия дисперсной фазы дистиллированной воды // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2022. Т. 7, № 1. С. 25–31.
5. *Yakhno T.A., Yakhno V.G.* Water as a Microdispersed System. Water “Activation” Mechanism. Water Phases at Room Conditions // *WATER SPECIAL EDITION: Evidence of Water Structure*. 2022. doi:10.14294/WATER.2021.S2.
6. *Яхно Т.А., Яхно В.Г.* «Феномен капли кофе» и его временные флуктуации. Автономные колебательные процессы в коллоидных жидкостях // *ЖТФ*. 2017. 87(3). С. 323–330.
7. *Yakhno T. and Yakhno V.* Water-induced self-oscillatory processes in colloidal systems by the example of instant coffee // *JOBARI*. 2017. 20(2): 70–83.
8. *Яхно Т.А., Яхно В.Г.* Исследование роли микродисперсной фазы воды при переходе ее в состояние активации // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2020. Т. 5, № 1. С. 43–51.
9. *Яхно Т.А., Санин А.Г., Казаков В.В., Пахомов А.М., Яхно В.Г.* Динамика высыхающей капли для диагностики жидких сред. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2025.
10. *Yakhno T.A., Sanin A.G., Yakhno V.G.* Microstructure of Water Sediments on Hydrophilic Surfaces // *Water. A multidisciplinary Research Journal*. Published: February 11, 2023. doi:10.14294/WATER.2022.5.
11. *Yakhno T., Yakhno V.* Clusters of microparticles in distilled water: a kaleidoscope of versions and paradoxes of nature (Review) <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.15384>.
12. *Борило Л.П.* Тонкоплочные неорганические наносистемы / под ред. д.т.н. проф. В.В. Козика. Томск : ТГУ, 2012. 134 с.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А		Красильникова А.А.	77	Сутормина Н.В.	106
Абрашкин А.А.	7	Кубряк О.В.	69	Т	
Александров И.О.	11	Кузенков О.А.	50, 79, 99	Танасова С.Б.	31, 141
Александров Ю.И.	41	Кузенкова Г.В.	82	Тищенко А.Г.	41
Александрова Н.Ш.	15, 153	Курганов Д.П.	93	Толоконников Г.К.	144, 158
Алексеев А.К.	17	Кухарева А.Ю.	63	Томашук К.К.	55
Антонец В.А.	20, 24, 34	Л		Ф	
Б		Лазаренко И.А.	85	Филатов М.А.	63
Белощенко Д.В.	28	Лахов К.А.	82	Филатова О.Е.	146
Бондарь А.Т.	31, 141	Лебедев А.А.	89	Фомин И.С.	148
Бохонко М.Б.	34	Ли Я.	69	Х	
Буркова С.А.	35	Лисин А.А.	90	Хилько А.И.	90
В		Лобов С.А.	93, 95	Ч	
Варганов А.В.	38	М		Чернавская О.Д.	153
Варфоломеева А.В.	41	Максимова Н.Е.	11	Черноиванов В.И.	158
Вечкапова С.О.	44	Мальшев Ю.А.	95	Чирко Р.А.	28
Виногорова В.Н.	48	Медведев А.В.	50, 99	Ш	
Витко М.А.	69	Мельникова Е.Г.	63	Швец Т.А.	127
Г		Михайлова Е.В.	101	Шевырина В.А.	160
Гавриленко Т.В.	28	Морозова С.В.	103	Шубина Л.В.	31
Головина А.А.	50	Н		Я	
Горбунов И.А.	52	Нечесов А.В.	108	Яковец Е.Н.	65
Григорьева В.Н.	139	Николаева Е.И.	106	Яхно В.Г.	95, 110, 164
Грищенко А.А.	57	Нуйдель И.В.	110	Яхно Т.А.	164
Громов В.А.	55	О			
Д		Ольшанский В.М.	114		
Демчева А.А.	72, 134	П			
Джафарова А.С.	57	Паренко М.К.	77		
Добрынина И.Ю.	146	Парин С.Б.	77, 101, 117		
Дыденкова Е.А.	60	Перочкин К.И.	127		
Е		Полевая С.А.	77, 127, 129		
Еськов В.В.	146	Поляков Н.Ф.	7		
Еськов В.М.	63, 146	Проскура А.Л.	44, 160		
Ж		Пупкина М.Е.	85, 121		
Жаринов А.И.	93	Р			
И		Разумникова О.М.	124		
Иванова В.В.	72	Ратушняк А.С.	44, 160		
Иванова О.А.	65	Ронжин Д.В.	127, 129		
К		С			
Казанцев В.Б.	68, 93	Ситникова Е.Ю.	85, 121, 131		
Калабина И.А.	106	Славинская А.Н.	60		
Квашнин Д.В.	7	Сорокоумов Е.Д.	160		
Ковальчук С.В.	69	Станкевич Л.А.	110, 134		
Корнилов М.В.	57	Стасенко С.В.	89		
Корсаков А.М.	72, 134, 148	Судейманова Е.М.	57		
		Сундуков Д.И.	139		

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Абрашкин А.А., Квашнин Д.В., Поляков Н.Ф.</i> Пучеж-Катунский астероид как причина глобального земного катаклизма	7
<i>Александров И.О., Максимова Н.Е.</i> Нейрональный субстрат информационных моделей взаимодействия между компонентами психологической структуры	11
<i>Александрова Н.Ш.</i> Как рисуют пациенты, дети и нейросети	15
<i>Алексеев А.К.</i> Квантовые аналогии процессов познания и эффективная квантовость нейросетей	17
<i>Антонец В.А.</i> К методологии когнитивных исследований	20
<i>Антонец В.А.</i> Об эволюции в неравновесной среде	24
<i>Белощенко Д.В., Гавриленко Т.В., Чирко Р.А.</i> Исследование влияния музыкальных предпочтений на когнитивные процессы	28
<i>Бондарь А.Т., Шубина Л.В., Танасова С.Б.</i> Частотно-зависимые свойства нелинейных процессов человека и морской свинки при фотостимуляции	31
<i>Бохонко М.Б., Антонец В.А.</i> On-line измерения в модальном пространстве	34
<i>Буркова С.А.</i> Особенности вегетативной регуляции детей из семей с разными типами наказания и поощрения	35
<i>Вартанов А.В.</i> Мозговые механизмы семантики: информационный подход	38
<i>Варфоломеева А.В., Тищенко А.Г., Александров Ю.И.</i> Методика оценки синхронизованности сердечного ритма у участников диады при решении сложных когнитивных задач	41
<i>Вечкапова С.О., Ратушняк А.С., Проскура А.Л.</i> Перекрестные взаимодействия в регуляции локального биосинтеза и ремоделирования цитоскелета синапсов	44
<i>Виногорова В.Н.</i> Оценка пластичности мозга детей раннего возраста	48
<i>Головина А.А., Медведев А.В., Кузенков О.А.</i> Модель многозадачных режимов в случае выбора языковой альтернативы: связь с моделью Абрамса – Стрататца и интерпретация языковой волатильности	50
<i>Горбунов И.А.</i> Динамика фрактальной размерности суммарной электрической активности в процессе обучения человека и нейросетевых моделей	52
<i>Громов В.А., Томащук К.К.</i> Построение полной бифуркационной картины нелинейных уравнений в частных производных	55
<i>Джафарова А.С., Грищенко А.А., Сулейманова Е.М., Корнилов М.В.</i> Алгоритм для распознавания эпилептических припадков у крыс на основе анализа временно-частотных характеристик	57
<i>Дыденкова Е.А., Славинская А.Н.</i> Пластичность рабочей памяти у детей с опытом институционализации	60
<i>Еськов В.М., Филатов М.А., Кухарева А.Ю., Мельникова Е.Г.</i> Перспективы квантовой теории сознания	63
<i>Иванова О.А., Яковец Е.Н.</i> Адаптационный потенциал и риски в развитии рабочей памяти дошкольников, родившихся недоношенными	65
<i>Казанцев В.Б.</i> Нейроморфная кибернетика	68
<i>Ковальчук С.В., Витко М.А., Ли Я., Кубряк О.В.</i> Когнитивно-ориентированный подход к проектированию гибридных систем поддержки принятия решений для сложных предметных областей	69
<i>Корсаков А.М., Иванова В.В., Демчева А.А.</i> Способ управления мобильным роботом с использованием механизма формирования ассоциативных связей	72
<i>Красильникова А.А., Паренко М.К., Парин С.Б., Полевая С.А.</i> Проба Вальсальвы как экспериментальная модель стресса	77
<i>Кузенков О.А.</i> Популяционная динамика неврожденной информации	79
<i>Кузенкова Г.В., Лахов К.А.</i> Система обнаружения вторжений в сетевом трафике на основе алгоритмов машинного обучения	82
<i>Лазаренко И.А., Пупкина М.Е., Ситникова Е.Ю.</i> Моделирование динамики когнитивных процессов у крыс: анализ условно-рефлекторного поведения	85
<i>Лебедев А.А., Стасенко С.В.</i> Коррекция ошибок при многоклассовой классификации изображений на несбалансированных выборках	89

<i>Лисин А.А., Хилько А.И.</i> Применение нейроподобной функции невязки для обработки гидроакустических сигналов, принятых горизонтальной антенной решеткой	90
<i>Лобов С.А., Жаринов А.И., Курганов Д.П., Казанцев В.Б.</i> Сетевая консолидация памяти, опосредованная структурной пластичностью	93
<i>Мальшиев Ю.А., Лобов С.А., Яхно В.Г.</i> Разработка двухпорогового алгоритма распознавания ориентиров в биоморфной системе визуальной навигации	95
<i>Медведев А.В., Кузнецов О.А.</i> Математическое моделирование языковой ассимиляции мигрантов: эффект четырех поколений.....	99
<i>Михайлова Е.В., Парин С.Б.</i> Некоторые особенности когнитивных функций при употреблении психоактивных веществ.....	101
<i>Морозова С.В.</i> Связь сложности абстрактных изображений AFIS с оценкой их эмоциональной валентности	103
<i>Николаева Е.И., Сутормина Н.В., Калабина И.А.</i> Сравнительный анализ процессов коннективности детей до и после игры с использованием гаджета	106
<i>Нечесов А.В.</i> Гибридная методология построения имитационных моделей сильного искусственного интеллекта.....	108
<i>Нуйдель И.В., Станкевич Л.А., Яхно В.Г.</i> Ресурсные диаграммы – удобный инструмент для описания вариантов динамики живых систем.....	110
<i>Ольшанский В.М.</i> Электрические рыбы, формирование образов электрических событий и идеи умвельта/гегенвельта Якоба фон Иксколя	114
<i>Парин С.Б.</i> Нижегородская нейронаука в лицах	117
<i>Пупкина М.Е., Ситникова Е.Ю.</i> Анализ копинговых стратегий в классической парадигме активного избегания.....	121
<i>Разумникова О.М.</i> Роль исполнительного контроля в гетероиерархической организации системы когнитивных резервов	124
<i>Ронжин Д.В., Перочкин К.И., Швец Т.А., Полевая С.А.</i> Мультилингвистический тест Струпа как грубый детектор стратегий обучения	127
<i>Ронжин Д.В., Полевая С.А.</i> Психофизиологические маркеры аутистических черт	129
<i>Ситникова Е.Ю.</i> «Когнитивный таламус» человека и грызунов	131
<i>Станкевич Л.А., Корсаков А.М., Демчева А.А.</i> Планирование поведения робота с элементами креативности	134
<i>Сундуков Д.И., Григорьева В.Н.</i> Нарушения зрительно-пространственной памяти при инсульте: факторы риска	139
<i>Танасова С.Б., Бондарь А.Т.</i> Частотно-зависимая нелинейная динамика ЭЭГ и HRV при фотостимуляции в тета-альфа-диапазоне	141
<i>Толоконников Г.К.</i> Бинарные склейки как модельный пример для категорного описания нейронных сетей.....	144
<i>Филатова О.Е., Еськов В.В., Добрынина И.Ю., Еськов В.М.</i> Новое представление «What is life?»	146
<i>Фомин И.С., Корсаков А.М.</i> Исследование сегментной импульсной модели нейрона в задаче распознавания локаций по данным обнаружения объектов.....	148
<i>Чернавская О.Д., Александрова Н.Ш.</i> О понимании и моделировании полушарной асимметрии в живых и искусственных когнитивных системах (синергетический подход)	153
<i>Черноиванов В.И., Толоконников Г.К.</i> Биомашсистемы для ветеринарии и медицины	158
<i>Шевырина В.А., Сорокоумов Е.Д., Проскура А.Л., Ратушняк А.С.</i> Анализ принципов моделирования биологических цифровых информационных молекулярных машин	160
<i>Яхно Т.А., Яхно В.Г.</i> Микроструктура и фазовые превращения воды и водных растворов по данным оптической и сканирующей электронной микроскопии	164
<i>Авторский указатель</i>	165

Научное издание

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2025**

ТРУДЫ IX ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Редакторы *Н.Н. Кралина, М.Ю. Кузнецова*
Технический редактор *Д.П. Семенова*
Компьютерная верстка *М.В. Башевой*
Обложка *С.В. Кротовой*

Подписано в печать 1.08.2025 г. Формат 84¹/8.
Усл. печ. л. 21,0. Уч.-изд. л. 19,8.
Тираж 100 экз. Заказ № 23(2025).

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