Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019

Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019

ТРУДЫ VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Нижний Новгород
2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет ВШЭ
Сургутский государственный университет ХМАО-Югры
Приволжский исследовательский медицинский университет

Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований
Российская ассоциация нейроинформатики
ООО «Медуза»

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2019

ТРУДЫ
VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2019

УДК 159.9.07(063)
ББК 88.25я431
Н49

Издано по решению редакционно-издательского совета
ФИЦ «Институт прикладной физики 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.А. Полевая

Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019 : труды VI Всероссийской
Н49 конференции / Федер. исслед. центр Ин-т приклад. физики РАН [и др.] ; отв. ред. В.А. Антонец, С.Б. Парин, В.Г. Яхно. – Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2019. – 234 с. + 10 с. аннот.

ISBN 978-5-8048-0092-6

Сборник содержит доклады VI Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019» (Нижний Новгород, 23–27 сентября 2019 г.). Конференция посвящена текущему состоянию, перспективам и новым возможностям экспериментальных исследований и формализованного описания когнитивных процессов, а также проблемам создания симуляторов живых систем.

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

УДК 159.9.07(063)
ББК 88.25я431

ISBN 978-5-8048-0092-6

© ИПФ РАН, 2019

Программный комитет конференции

Председатель:

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

Сопредседатели:

Александров Юрий Иосифович (Институт психологии РАН, Москва)

Анохин Константин Владимирович (МГУ, НИИ нормальной физиологии им. П. К. Анохина, Москва)

Киреев Максим Владимирович (Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН, Санкт-Петербург)

Черниговская Татьяна Владимировна (СПГУ, Санкт-Петербург)

Шумский Сергей Александрович (ФИ РАН, Москва)

Члены программного комитета:

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

Величковский Борис Митрофанович (НИЦ «Курчатовский институт», Москва)

Григорьева Вера Наумовна (ПИМУ, Нижний Новгород)

Горбань Александр Николаевич (Университет Лестера, Великобритания; ННГУ, Нижний Новгород)

Дорожкин Александр Михайлович (ННГУ, Нижний Новгород)

Дунин-Барковский Виталий Львович (Центр оптико-нейронных технологий НИИСИ РАН, Москва)

Жданов Александр Аркадьевич (ИТМиВТ РАН, Москва)

Еськов Валерий Матвеевич (Сургутский государственный университет)

Иваницкий Алексей Михайлович (ИВНДиНФ РАН, Москва)

Казанцев Виктор Борисович (ННГУ, Нижний Новгород)

Кибрик Андрей Александрович (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)

Карякин Николай Николаевич (ПИМУ, Нижний Новгород)

Крылов Андрей Константинович (Институт психологии РАН, Москва)

Подладчикова Любовь Николаевна (НИИ НК ЮФУ, Ростов-на-Дону)

Полевая Софья Александровна (ННГУ, ПИМУ, Нижний Новгород)

Парин Сергей Борисович (ННГУ, Нижний Новгород)

Ратушняк Александр Савельевич (КТИ ВТ СО РАН, Новосибирск)

Редько Владимир Георгиевич (Центр оптико-нейронных технологий НИИСИ РАН, Москва)

Самарин Анатолий Иванович (НИИ НК ЮФУ, Ростов-на-Дону)

Сергеев Александр Михайлович (Российская академия наук, Москва)

Станкевич Лев Александрович (СПИИ РАН, Санкт-Петербург)

Чернавская Ольга Дмитриевна (ФИ РАН, Москва)

Яхно Владимир Григорьевич (ИПФ РАН, Нижний Новгород)

Оргкомитет конференции

Яхно Владимир Григорьевич, ИПФ РАН, Нижний Новгород (*председатель*)

Парин Сергей Борисович, ННГУ, Нижний Новгород (*зам. председателя*)

Нуйдель Ирина Владимировна, ИПФ РАН, Нижний Новгород (*ученый секретарь*)

Антонец Владимир Александрович, ННГУ, ИПФ РАН, Нижний Новгород

Беллюстин Николай Сергеевич, НИРФИ, Нижний Новгород

Баевский Юрий Евгеньевич, НИУ ВШЭ, Нижний Новгород

Воловик Михаил Григорьевич, НижНИИТиО, Нижний Новгород

Стасенко Сергей Викторович, ННГУ, Нижний Новгород

Ковальчук Андрей Викторович, ИПФ РАН, Нижний Новгород

Полевая Софья Александровна, ННГУ, ПИМУ, Нижний Новгород

Соколов Максим Евгеньевич, ИПФ РАН, Нижний Новгород

Тельных Александр Александрович, ИПФ РАН, Нижний Новгород

Шемагина Ольга Владимировна, ИПФ РАН, Нижний Новгород

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 7

Аверкина Л.А. Магический реализм – явление в искусстве и литературе XX–XXI веков 9

Айдаркин Е.К. Взаимодействие перцептивных, центральных и моторных компонентов бимодальной реакции выбора 12

Александров Ю.И., Апанович В.В. Значение меж- и внутрикультурных ментальных вариаций 16

Александров И.О., Максимова Н.Е., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С. Эйлерова характеристика непланарностей в топологии психологических структур 18

Александрова Н.Ш. Зрительные агнозии и двойственность зрительного опознания 22

Александрова Н.Ш., Антонец В.А., Нуйдель И.В., Шемагина О.В., Яхно В.Г. Моделирование режимов спонтанного освоения нескольких языков как инструментов общения 27

Алексеев А.К. Перенос ценной информации и причинность 31

Антонец В.А. Постулаты теории мышления и их следствия. Часть первая 34

Астахова Д.И., Сысоева М.В., Сысоев И.В. Выявление направления связи в ансамблях нейроосцилляторов по их временным рядам методом частной направленной когерентности 38

Бахшиев А.В., Станкевич Л.А. Моделирование процессов оптимизации ресурсов нейрона как элемента самоорганизующихся динамических нейронных структур 41

Белобров П.И. Биологическая метрология познавательных функций 45

Бондарь А.Т., Федотчев А.И., Полевая С.А. Пространственные особенности нелинейных процессов в коре головного мозга человека 49

Боровкова Е.И., Караваев А.С., Безручко Б.П. Диагностика направленных связей между медленными колебаниями потенциалов головного мозга и процессом дыхания 51

Бронфельд Г.Б., Киров Д.И. Принципиальный подход к практически вечному сохранению знаний на основе технологии прямого наложения знаний 54

Величковский Б.М. Grand Design когнитивной организации: междисциплинарная одиссея 58

Дорошева Е.А. Особенности аффективно-когнитивных регуляторных процессов у матерей, воспитывающих детей с расстройством аутистического спектра 59

Дорошева Е.А. Стратегии эмоциональной регуляции в структуре эмоционального интеллекта 63

Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатов М.А., Григорьева С.В. Возможности квантовой механики в когнитивных науках 66

Журавлев М.О., Руннова А.Е. Методы анализа электрической активности головного мозга человека и расчета объективных численных критериев колебательной активности на ЭЭГ-сигналах 69

Журавлев М.О., Руннова А.Е., Крючков Ю.А., Щуковский Н.В. Методы поиска и оценки выраженности паттернов воображаемой и реальной двигательной активности пациента в постинсультном периоде на основе радиофизической интерпретации ЭЭГ-сигналов 71

Зайцева И.О. Применение телеметрии функционального состояния человека для оценки эффективности и безопасности виртуального тренинга 73

Ивашкина В.А., Захарчук А.Г., Жеребцов С.В., Спивак И.М. Когнитивные функции и возраст-ассоциированные патологии. Творчество против старения 76

Каганов Ю.Т., Гапанюк Ю.Е. Символическая динамика, метаграфы и интеллект 78

Казанович Я.Б. Нейросетевая модель детекции известности 80

Караваев А.С., Боровкова Е.И., Безручко Б.П. Фазовая синхронизация между медленными колебаниями потенциалов головного мозга и процессом дыхания 84

Клочков Б.Н. Модель волнового транспорта в сосудистой системе с учетом локальной активной регуляции 88

Князева И.С., Бойцова Ю.А., Макаренко Н.Г., Данько С.Г. Разделение состояний ментального и сенсорного внимания по ЭЭГ-данным с помощью сверточных нейронных сетей..... 92

Корсакова-Крейн М. Овеществленное сознание в свете теории музыки..... 96

Крылов А.К. Самодетерминация актуализации опыта порождает фрактальную структуру поведения..... 100

Кузенков О.А., Кузенкова Г.В. Идентификация функции приспособленности с использованием нейронных сетей 103

Кузенков О.А., Кузенкова Г.В. Математическая модель передачи информации в процессе обучения 107

Кузнецов А.А. Пролегомены к иному взгляду на природу галлюцинаций, шизофрению и нелинейная динамика 109

Лосик Г.В., Бойко И.М., Петров С.В. Антропологический механизм передачи знаний от поколения к поколению..... 113

Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С. Конкуренция за ресурс дифференциации в процессе формирования психологических структур 116

Медведева Т.М., Сысоева М.В., Люттйоханн А., Луйтелаар Ж., Сысоев И.В. Моделирование абсансной эпилепсии сложной осцилляторной нейронной сетью 120

Меклер А.А., Ткачёва Л.О., Станкова Е.П., Волохонский В.Л. Успешность выполнения когнитивных заданий при изменении их сложности в различных условиях 121

Минина Е.Н., Ластовецкий А.Г. Системно-когнитивные технологии в медико-биологических исследованиях 122

Никонов Ю.В. О формализации описания амнестического синдрома 124

Нужина Н.С., Продиус П.А., Мухина И.В. Поиск взаимосвязей между особенностями поведения взрослых испытуемых и компонентами ССП в парадигмах go/nogo и novel..... 127

Нуйдель И.В., Соколов М.Е., Шемагина О.В. Расчеты динамических процессов на модели кортикальной колонки с учетом нейрон-глиального взаимодействия..... 130

Ольшанский В.М. Становление электродинамики как модельный эволюционный эксперимент. Часть 2. Мучительная проблема истинности животного электричества 135

Орлов А.В. Значение личностных качеств в проявлении характеристик принятия решений 137

Павловская М.А. Исследование дельта-, тета- и альфа-вызванной ритмической активности мозга человека в условиях сенсорной маскировки 140

Парина И.С., Парин С.Б. Динамика вегетативного обеспечения и стрессогенности промежуточного контроля процесса обучения устному переводу 143

Пляшкевич В.Л. Образ-алгоритм как мозговой механизм действия руки предметом и произнесения слова речи..... 145

Полевая С.А., Савчук Л.В., Федотчев А.И., Селиверстова К.К., Парин С.Б. Цифровое психофизиологическое картирование: поиск маркеров синдрома дефицита внимания с гиперактивностью у детей..... 149

Полевая С.А., Циркова М.М., Тельных Н.А. Цифровое психофизиологическое картирование: особенности сенсомоторной активности при очаговых нарушениях мозгового кровообращения..... 152

Проскура А.Л., Запара Т.А., Ратушняк А.С. Анализ механизмов влияния лептина на синаптическую пластичность в гиппокампе..... 154

Ратушняк А.С., Запара Т.А., Проскура А.Л., Сорокоумов Е.Д. Физические принципы функционирования биологических молекулярных информационных машин..... 158

Савицкая Т.Ю., Александров Ю.И. Показатели динамики сердечного ритма и оценка эмоционально окрашенных изображений 161

Ситникова Е.Ю. Нарушения нейросетевой ритмической активности: таламокортикальная дизритмия 163

Скакун А.И., Балаев В.В., Ефимов К.В., Котович Ю.В., Тетерева А.О., Кашеварова О.Д., Малиновская П.И., Атанов М.С., Мартынова О.В., Иваницкий Г.А. Распознавание ошибки по сигналам мозга в межстимульный интервал 166

Сляднев С.Е., Панкрашкина Н.Г., Хроматов В.Е. Традиция когнитивного подхода научных школ Мандельштама – Андронова – Неймарка 170

Созинов А.А., Бахчина А.В., Жиганов Л.С., Гринченко Ю.В., Александров Ю.И. Научение чередованию двух форм поведения как формирование индивидуального опыта 173

Созинова И.М., Александров Ю.И. Психофизиологические закономерности решения межгрупповых конфликтных ситуаций при вариации условий социального присутствия 176

Сысоев И.В., Lüttjohann A.K. Реконструкция сети нейроосцилляторов по экспериментальным данным локальных потенциалов мозга 180

Сысоева М.В., Van Rijn C.M., Сысоев И.В. Результат введения агониста CB_1-рецепторов (WIN55,212-2) крысам линии WAG/Rij 182

Сычева Е.Е., Полевая А.В. Особенности окуломоторной активности у людей, склонных к нарушениям пищевого поведения 185

Тищенко А.Г., Апанович В.В., Созинов А.А., Цхадаиа Л.Г., Александров Ю.И. Сравнительный анализ характеристик текстовых и игровых задач 187

Ткаченко В.В., Лосик Г.В., Дерюгин А.А. «Образный» Интернет для кругового осмотра музейных статуй 191

Ушаков В.Л., Малашенкова И.К., Захарова Н.В., Шараев М.Г., Масленникова А.В., Arsalidou M., Вартанов А.В., Мамедова Г.Ш., Карташов С.И., Орлов В.А., Малахов Д.Г., Крынский С.А., Хайлов Н.А., Енягина И.М., Огурцов Д.П., Архипов А.Ю., Стрелец В.Б., Дорохов В.Б., Сбоев А.Г., Селиванов А.А., Молошников И.А., Величковский Б.М., Костюк Г.П. Конвергентные исследования нейрокогнитивных процессов головного мозга и иммунологического статуса больных шизофренией 193

Филатова О.Е., Еськов В.В., Филатова Д.Ю., Башкатова Ю.В. Модели эвристической работы мозга 199

Фомин И.С., Орлова С.Р., Бахшиев А.В. Использование глубоких сверточных сетей для обнаружения дорожных знаков в задаче автовождения 202

Хилько А.И., Хоботов А.Г., Хилько А.А., Калинина В.И. Когнитивные методы и алгоритмы адаптированного к изменчивости среды мультистатического подводного наблюдения 207

Хоботов А.Г., Калинина В.И., Хилько А.И., Беллюстин Н.С. Исследование эффективности нейроноподобных процедур свертки при подводной локации 211

Хоботов А.Г., Хилько А.И., Тельных А.А. Информационный подход к цифровой регистрации сигналов 215

Хрисанфова Л.А., Шивоева Д.А. Соотнесение субъективного восприятия цвета и порогов цветоразличения с уровнем тревожности человека 219

Цукерман В.Д. Что скрывает нейродинамика мозга? (Современные данные и модель) 222

Чеберева О.Н. Когнитивная урбанистика как исследование восприятия городской среды: задачи развития, состояние, перспективы 226

Шумский С.А. Символьное мышление роботов 230

Авторский указатель 233

Предисловие

В сборнике представлены материалы пленарных лекций, докладов на секционных и постерных секциях VI Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях», проходящей в Нижнем Новгороде 23–27 сентября 2019 года. Прошло уже 10 лет со времени нашей первой встречи, состоявшейся во многом благодаря активной поддержке тогдашнего президента Межрегиональной ассоциации когнитивных исследований (МАКИ) Татьяны Владимировны Черниговской и нынешнего президента РАН Александра Михайловича Сергеева. С тех пор конференция стала традиционной и раз в два года собирает ведущих специалистов по когнитивным исследованиям из разных регионов России и из-за рубежа. На настоящей конференции также представлены сообщения не только из базовых научных центров Российской Федерации (например, Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Новосибирска, Ростова, Пущино и других), но и из стран ближнего и дальнего зарубежья (в том числе из Белоруссии, США, Германии).

Необходимо подчеркнуть, что востребованность работ, представляемых на нашей конференции, за прошедшее десятилетие существенно возросла. Это связано с все более активным внедрением в различные области когнитивной науки точных естественно-научных методов исследования и концептуальных подходов, свойственных, прежде всего, физике и математике. Поэтому далеко не случайно в названии нашей конференции сугубо физико-математическая «нелинейная динамика» объединена с гуманитарными, казалось бы, «когнитивными исследованиями». Мы глубоко убеждены, что поступательное движение когнитивной науки, являющейся, по существу, наследницей сразу нескольких направлений кибернетики как науки «об управлении и связи в животных, машинах, человеке и обществе» (Н. Винер), возможно исключительно на взаимодействии естественно-научного и гуманитарного знания. Однако нельзя не признать, что это взаимодействие постоянно сталкивается с проблемой «вавилонского столпотворения»: чрезвычайно специализированные языки разных областей человеческого знания, своего рода «лабораторные сленги», порождают не только непонимание друг друга, но нередко и откровенное раздражение. Отсюда одна из главных задач настоящей конференции: обеспечить максимально тесное и дружелюбное взаимодействие специалистов самых различных научных направлений для сближения методологических позиций и выработки синтетической системы понятий, вызывающих наименьшее отторжение и у гуманитариев, и у представителей естественно-научных направлений. Как принято у физиков, «сначала договоримся о терминологии». Следующий шаг в этом направлении – выработка совместных минимально противоречивых концепций. Нужно отметить, что этот процесс идет, хотя и гораздо медленнее, чем хотелось бы.

Еще одна задача нашей конференции – совместный поиск путей построения моделей, способных адекватно описывать поведение живых и искусственных когнитивных систем в различных контекстах. Всем известно, что любая концепция – это модель, любое определение – уже модель. Проблема создания формализованных, математических моделей когнитивных систем заключается, прежде всего, в выборе оптимального уровня обобщения для определенных областей исследований. Нет оснований сомневаться в чрезвычайной важности моделирования клеточных и субклеточных процессов в живых системах. Однако нужно отдавать себе отчет, что при том уровне знания (а точнее – незнания), на котором находится современная клеточная нейробиология, математические модели способны скорее высвечивать многочисленные белые пятна в нашем понимании принципов работы микромира, чем подсказывать верные решения. В самом деле, конец XX – начало XXI века стали эпохой не открытий, а скорее «закрытий» в этой области. В качестве примера можно привести трагикомическую ситуацию с моделированием процессов синаптической передачи, когда только в редчайших случаях в моделях учитывается множественность медиаторов в единичном синапсе, наличие разнообразных пресинаптических рецепторов, чрезвычайная сложность молекулярно-биологического комплекса подмембранных процессов и т. д. Только на роль медиаторов сегодня претендует несколько тысяч молекул в основном пептидной природы. В математических же моделях по-прежнему доминирует принцип Дейла, несостоятельность которого была доказана еще в 70-х годах XX века. Отсюда понятно, что такого рода нано- и микромоделирование очень нескоро сможет дать какие-то плоды для понимания когнитивных процессов. Существенно успешнее развивается нейросетевое моделирование, которое уже не одно десятилетие приносит не только серьезные теоретические знания, но и вполне востребованные практические результаты. Оно, как правило,

основано не на слепом воспроизведении морфологии природных нейронных сетей, а на имеющихся знаниях о принципах их функционирования. В результате удается достичь серьезных прогностических прорывов и продвигать эти знания дальше, а понятие когнитивных роботов перестало быть околонаучным анекдотом.

Очень перспективным является направление, связанное с системным моделированием, наиболее близко связанным с базовыми кибернетическими подходами. Далеко не случайно в научной литературе все чаще упоминается теория функциональных систем П.К. Анохина (порой без ссылок на автора), по сути, положившая начало системному подходу в нейрофизиологии, а в дальнейшем и в моделировании. Именно с этой парадигмой связаны последние достижения ведущих мировых когнитивных школ (Коха, Эдельмана, Тонони, Дамассио и др.). На нашей конференции традиционно представлены работы всех этих направлений моделирования, что позволяет сблизить позиции исследователей.

Принципиально важным является вопрос приложения физических принципов измерения к живым, в том числе когнитивным, системам. Известно, что существенные прорывы в химии были связаны именно с внедрением физических методов. Позднее пришла очередь нейробиологии, а сегодня и когнитивной науки. Разработка новых и модификация ранее известных физических методов детектирования когнитивных процессов становится все более актуальной задачей. Разнообразие подходов требует согласования интерпретаций получаемых результатов. Кроме того, появляются методы коррекции состояния когнитивных систем, основанные на физических принципах. На протяжении всех десяти лет одной из основных задач нашей конференции было и остается заинтересованное обсуждение и распространение новых практических разработок в этой области.

Наконец, нужно понимать, что раскручивающемуся маховику информационной войны (и в исходном, сугубо военном смысле, когда задачи сводились к получению чужой закрытой информации, внесению в нее максимального количества помех, хаоса и, соответственно, к разработке мер противодействия этому; и в современном смысле, когда хаос порождается уже в умах жителей планеты) реально противостоять может именно когнитивная наука. Хочется надеяться, что наши конференции в какой-то мере способствуют этому.

Таким образом, традиционная нижегородская конференция «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» в меру имеющихся ресурсных возможностей старается решать основные задачи по максимальному согласованию позиций самых разных представителей мультидисциплинарной когнитивной науки. Безусловно, такой подход несет риски некоторой эклектичности наших традиционных сборников, однако мы считаем, что цель достижения взаимопонимания оправдывает эти риски. Во всяком случае, такие понятия, как «цифровая психофизиология», «физика когнитивных систем», «биологическая активность информационных образов», перестают вызывать ориентировочный рефлекс, что вселяет определенный оптимизм.

Желаем всем нам успеха!

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

Магический реализм – явление в искусстве и литературе XX–XXI веков

Л.А. Аверкина

Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова
larissa.averkina@mail.ru

Что такое *магический реализм*? Магический реализм – это художественный метод, в котором магические элементы включены в реалистическую картину мира. Впервые термин «магический реализм» употребил немецкий критик Франц Рох в книге «Постэкспрессионизм (1925) для описания «новой вещественности» – жанра живописи. Ф. Рох писал об удивительной реальности на полотнах художников, которая с помощью смещения перспективы и искажения пространственного жизнеподобия приобретала «магическое» наполнение [1. С. 274].

Термин «магический реализм» применительно *к литературе* впервые был предложен французским критиком Эдмоном Жалу в 1931 году. Позже этот же термин был использован венесуэльцем Артуро Услар-Пьетри для описания работ некоторых латиноамериканских писателей. Кубинский писатель Алехо Карпентьер использовал термин *«lo real maravilloso»* (приблизительный перевод – «чудесная реальность») в предисловии к своей повести «Царство земное» (1949). Идея Карпентьера заключалась в описании своего рода обостренной реальности, в которой могут появляться выглядящие странно элементы чудесного. Произведения А. Карпентьера, а также Хорхе Луиса Борхеса, Габриэля Гарсия Маркеса, Хулио Кортасара, Мигеля Анхеля Астуриаса и др. оказали в дальнейшем сильное влияние на европейский бум жанра, который начался в 60-е годы XX века [2. С. 229].

Кроме прозы латиноамериканского магического реализма, в литературе XX в. А.А. Гугнин выделяет следующие значимые произведения, относящиеся, на его взгляд, к данному направлению: советские писатели А. Платонов «Чевенгур» (1929), «Котлован» (1930); М.А. Булгаков («Мастер и Маргарита» (1940); И. Андрич «Проклятый двор» (1954) и др. А в русской литературе классиками магического реализма можно считать, по его мнению, Н.В. Гоголя (петербургские повести – «Портрет», 1835; «Невский проспект», 1835; «Нос», 1836), Д. Хармса («Случаи и вещи») [3. С. 70]. В современной европейской литературе представителями магического реализма следует назвать Джонатана Кэрролла, Одри Ниффенгер, Марка Хелприна, Милорада Павича и Горана Петровича.

В литературоведении до сих пор нет единой точки зрения по определению сути магического реализма. Все еще ведутся споры о том, что же это – художественный метод, нарративная стратегия, литературный стиль или разновидность фантастической литературы? Предпринимаются попытки разграничить магический реализм и другие литературные направления.

Так, итальянский критик М. Бонтемпелли отмечает, например, что мир произведений магического реализма является не миром сказки, а повседневным миром прозаической реальности, наполненным авантюрными приключениями, тайнами и загадками. Он подчеркивает, что мир человека состоит из двух реальностей, реальной и воображаемой. И они должны быть органически сплетены одна с другой. При этом на первый план выдвигается воображение художника, поскольку без воображения творить новые мифы и легенды он не может, и, следовательно, воссоздание сложного «двоемирия» XX века ему было бы неподвластно [3. С. 26].

Профессор Венского университета А. Зо в своем диссертационном исследовании, посвященном магическому реализму «Mimesis des Herzens, Momente der Epiphanie. Magischer Realismus in zeitgenössischen Romanen und Filmen» (2011) также утверждает, что в отличие от сюрреализма, фэнтези и гротескного реализма в магическом реализме нереальное воплощено в физической реальности и ощущается как нечто само собой разумеющееся [4. С. 5]. Другими словами, реальное и нереальное настолько тесно переплетаются, что образуют новую реальность. Это и является особенностью магического реализма.

Сегодня все чаще говорят о развитии магического реализма как тенденции мирового литературного процесса. Интересно мнение английских специалистов Л.П. Замора и У. Фэррис: «Общемировая тенденция, связанная с обращением писателей к магическому реализму, продиктована не только той новаторской энергией, которую несет в себе новой метод, но и тем, что магический реализм подает импульс к воссозданию связей с теми традициями, которые некоторое время находились в тени ограничительных принципов миметических границ реализма XIX и XX века» [5. С. 123].

Таким образом, можно считать, что появление этого метода исторически обусловлено. В условиях глобализации и культурного обмена, в том числе и обмена литературными традициями, магический реализм как художественный метод был перенят и западноевропейскими писателями.

Среди причин, обусловивших развитие европейского магического реализма, английский исследователь М.А. Бауэрс (2004) в первую очередь называет также интерес современного человека к сверхъестественному [6. С. 87]. И кроме того, европейская литература последнего времени характеризуется поиском новых форм, жанровыми экс-

периментами, подчеркивает он. Ю.К. Казакова отмечает также, что причина поиска новых форм проста: в условиях дегитализации общества, клипового мышления, развития аудиовизуальных средств массовой информации интерес к литературе падает, поэтому авторы экспериментируют с имеющимися в их арсенале средствами, сочетают элементы мелодрамы, фантастики, триллера и, конечно, особенно популярного в современной культуре магического реализма [7. С. 63].

Несомненным образцом магического реализма считается произведение Габриэля Гарсиа Маркеса «Сто лет одиночества». Новаторство Маркеса состоит в том, что ему удалось вписать фантастические образы в повседневную действительность так, что они не кажутся чем-то сверхъестественным. При этом если фантастическое в романе представлено как нечто естественное, то реалистические аспекты, связанные с жизнью в цивилизации, выглядят экзотически. Как признавался сам Маркес, он черпал волшебные образы из богатейшей мифологии Колумбии [8. С. 259]. Роман «Сто лет одиночества» Габриэля Гарсиа Маркеса, несомненно, оказал большое влияние на европейскую, в том числе и немецкоязычную литературу, в частности на Даниэля Кельмана, на создание некоторых его произведений, в частности романов «Измеряя мир», «Слава», «F».

Дэниэль Кельман (нем. *Daniel Kehlmann*) считается одним из самых ярких имен в немецкоязычной литературе последнего десятилетия. Он родился в 1975 году в Мюнхене в семье телевизионного режиссера Михаэля Кельмана и актрисы Дагмар Меттлер. Его дед, Эдуард Кельман, был австрийским писателем-экспрессионистом. В 1981 году родители Д. Кельмана вернулась в Вену, где Даниэль посещал иезуитскую школу в Коллегиум Калькбург, в Венском университете изучал философию и германистику и защитил диссертацию по проблеме возвышенного по И. Канту. Д. Кельмана нельзя назвать немецким или австрийским писателем, это немецкоязычный писатель и публицист, деятельность которого связана с обеими странами. Кельман является лауреатом многих премий: премии «Кандид» (2005), Клейста, Хаймито Додерера (2006), премии общества Конрада Аденауэра (2006), газеты Welt (2007), премии Томаса Манна (2008) и др.

В своих произведениях Д. Кельман играет с литературными традициями прошлого, создает мифологизированные картины мироздания, главной проблемой в которых является вопрос об осознании позиции современного человека в мире и реакция на социальные и культурные потрясения в стране. Сборник рассказов «Unter der Sonne» («Под солнцем», 1998), а также романы «Mahlers Zeit» («Время Малера», 1999), «Der fernste Ort» («Последний предел», 2001), «Ich und Kaminski» («Я и Каминский», 2003), «Die Vermessung der Welt» («Измеряя мир», 2005), «Ruhm» («Слава», 2009), «F» (2013) упрочили его славу в высшей степени талантливого писателя с богатой фантазией и точными формулировками.

Д. Кельман наиболее известен, как автор сатирико-юмористического романа «Die Vermessung der Welt», мгновенно ставшего бестселлером. В 2006 году он стал вторым по количеству проданных копий в мире. В основе романа – история жизни двух выдающихся немецких ученых: математика Карла Фридриха Гаусса (1777–1855) и естествоиспытателя Александра фон Гумбольдта (1769–1859). На первый взгляд, это совершенно разные, непохожие друг на друга люди: нелюдимый интроверт Гаусс, вряд ли когда-то покидавший пределы княжества Ганновер, и положительный авантюрист (выражаясь современным языком) А. фон Гумбольдт, путешествующий по всему земному шару и готовый покорить любую вершину мира. Но Кельману удалось показать, что у них есть много общего. Это люди, опередившие свое время, стремившиеся измерить всё в этом несовершенном, противоречивом мире. Кельман передает не только биографические факты, но и мысли, чувства этих людей, приступы паники и торжества. Во многом благодаря способности писателя точно передавать неосязаемое, лежащее за гранью разума, критики и публика с восторгом приняли этот роман. Подчеркивая популярность романа «Die Vermessung der Welt» и интерес публики к творчеству Д. Кельмана, яркому представителю поколения «новых рассказчиков», следует отметить, что этот роман переведен на 46 языков мира. А в 2012 году он был экранизирован режиссером Детлевом Буком.

Креативный и творческий энтузиазм Кельмана находится в постоянном поиске нового. В 2013 году он выпустил свой роман «F», попавший в лонг-лист немецкой литературной премии и вызвавший не меньший интерес у критиков и читателей, чем роман «*Die Vermessung der Welt»*. Роман «F», написан, как отмечают критики и сам автор, в соответствии с канонами «магического реализма», где сверхъестественные элементы включены в реальную картину мира. Д. Кельман в романе «F» умело синтезирует увлекательное повествование с серьезными вопросами, трансформируя немецкую литературу из интеллектуальной, «тяжелой» в литературу, обращенную к широкому культурному контексту.

По словам Д. Кельмана, «F» – это семейный роман. На примере судьбы трех братьев – Мартин, Эрик и Ивэн Фридланды – писатель затрагивает несколько проблем: церковь, экономика и искусство – три кита, три сферы современного общества, связанные тесными родственными узами, каждая из которых в настоящее время находится в глубоком кризисе.

Неслучайны профессии главных героев: Мартин, старший брат, – священник, который не верит в Бога, Эрик – инвестиционный консультант, обманывающий своих клиентов, младший брат Ивэн занимается подделкой картин. Несколько иронично Д. Кельман связывает судьбы Эрика и Мартина в финале романа. Эрик, финансовый консультант, обманывающий своих клиентов, обанкротившийся из-за финансового кризиса, в финале романа ста-

новится очень набожным, обращается к Богу, ищет у него спасения; в то время как священник Мартин окончательно теряет веру в Бога и даже не хочет проводить панихиду по пропавшему без вести брату Ивэну, считая полной глупостью, что песнопениями можно повлиять на решение Всевышнего [8. S. 148]. На примере жизни трех братьев, каждый из которых так или иначе связан с обманом, Д. Кельман показывает, насколько причудливо и тесно переплетает жизнь их судьбы.

Этот роман в отдельных пассажах напоминает роман М.А. Булгакова «Мастер и Маргарита» с его Воландом и представлением в варьете. Первая глава романа «F» «Великий Линдеман» («Der große Lindemann») также посвящена магическому представлению известного фокусника.

А в заключительной части своего романа «Времена года» («*Jahreszeiten*») Д. Кельман описывает снегопад, который будет идти в течение нескольких дней, занесет снегом дома и крыши, антенны, деревья, машины, дороги и сделает мир ослепительно красивым… Это аллюзия на бесконечный дождь, длившийся дни, недели, месяцы, годы, у Г. Гарсиа Маркеса в его произведении «Сто лет одиночества». При этом читателя не покидает чувство, что в описываемых событиях есть нечто демоническое, необъяснимое. Уже в названии роман интригует намеком на то, что в произведении тесно сплетено реальное и магическое. Из содержания романа видно, что семантическое поле у названия романа довольно широкое: «F» может быть отсылкой к большому количеству лексических единиц, которые в той или иной степени отражают содержание романа: Fatum (рус. фатум, судьба), Familie (рус. семья), Friedland (фамилия главных героев Фридланд), Fälschung (рус. фальсификация), Finanzkrise (рус. финансовый кризис), Fiasko (рус. фиаско, неудача).

Заключение. Магический реализм можно смело назвать явлением XX и XXI вв., ответной реакцией современного искусства на новую, стремительно меняющуюся картину мира и сложную многоплановую реальность. Магический реализм, который путем использования фольклорных и мифологических образов, обращения к историческому прошлому воспринимается как средство выражения национальной самоидентификации, ставшей важнейшим общеевропейским вопросом в контексте глобализации. Этот художественный метод позволяет охарактеризовать пережившее трансформацию европейское общество, которое из национально-гомогенного становится мультикультурным.

Литература

1. *Кислицын К.Н.* Магический реализм // Знание. Понимание. Умение. 2011. №1. С. 274–277.
2. *Шаршун С.* Магический реализм // Числа. 1932. № 6. С. 229.
3. *Гугнин А.А.* Магический реализм в контексте литературы и искусства XX века: феномен и некоторые пути его осмысления. М. : 1998. 117 с.
4. *Soo I.C.* Mimesis des Herzens, Momente der Epiphanie. Magischer Realismus in zeitgenössischen Romanen und Filmen: Diss. A 092 393. Dr. Phil. – Wien: Universität Wien, 2011. 280 s.
5. *Zamora, L.P., Wendy B.F.* Magical Realism: Theory, History, Community (4th ed.). Durham & London: Duke University Press, 2003. 592 p.
6. *Bowers, M.A.* Magic(al) Realism: The New Critical Idiom. London; N. Y.: Routledge, 2004. 150 p.
7. *Казакова Ю.К.* Творчество Даниэля Кельмана в контексте немецкоязычной литературы конца XX – начала XXI в.: дис… канд. филол. наук. Елабуга : Елабужский институт Казанского федерального университета, 2015. 169 с.
8. *Маслова Е.Г.* Магический реализм как парадигма культурно-художественного сознания современного общества // Вестник ЧГПУ. Челябинск : ЧГПУ, 2012. С. 254–269.
9. Kehlmann D. „F“. Reinbek bei Hamburg, Rowohlt Verlag GmbH, 2013. 384 s.

Взаимодействие перцептивных, центральных и моторных компонентов бимодальной реакции выбора

Е.К. Айдаркин

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Можно выделить ряд основных механизмов, обеспечивающих реализацию реакции выбора: перцептивная стадия (предобработка, извлечение основных параметров стимула и его идентификация) и связанные с двигательным ответом стадии (принятие моторного решения, моторное программирование и коррекция моторной реакции) [1, 2], которые взаимодействуют между собой и их активность перекрывается во времени. Предобработка обеспечивает процессы подготовки двигательных реакции, прогнозирования момента появления стимула и процессы антиципации [3, 4], что соответствует выбору стратегии реагирования на текущий стимул.

Момент предъявления стимула запускает перцептивные стадии, которые в условиях реакции выбора связаны с последовательными процессами регистрации, выбора сенсорного канала, идентификации и категоризации [5]. Принятие моторного решения в зависимости от стратегии реагирования может запускаться на одной из стадий сенсорного анализа. Затем развивается моторное программирование, которое состоит из двух стадий, связанных с формированием и реализацией двигательной программы [2, 6]. Предполагается, что моторная коррекция связана с премоторными процессами [7]. Наиболее важными факторами, определяющими длительность сенсомоторной интеграции (СМИ) являются время реакции (ВР), характеризующее сложность реакции, а также длительность двигательного компонента, связанного с набором последовательных элементарных моторных элементов [2, 6].

Взаимодействие указанных выше механизмов приводит к правильным или ошибочным ответам. Ошибки в основном связаны либо с неправильным принятием моторного решения, либо изменением стратегии реагирования на стимул. В современной литературе описаны отдельные стадии организации реакции выбора, в то время как характер их соотношения и взаимодействия в зависимости от стратегии реагирования остается неизученным.

Для исследования нейрофизиологических механизмов взаимодействия перцептивных, центральных и моторных компонентов при реализации реакции выбора используют сенсорные и моторные связанные с событием потенциалы (ССП).

Важным элементом, определяющим момент подготовки последующей реакции на текущий стимул, является CNV (Е-волна), которая отражает подготовку всех возможных в данной экспериментальной ситуации двигательных реакций, процессы антиципации и принятия решения [3, 4].

Указанные выше 4-й стадии перцептивного анализа в бимодальной реакции выбора соответствуют различным компонентам сенсорного ССП [5]. Предполагается, что стадия регистрации, связанная с первичной сенсорной оценкой свойств стимула, отражается в активации P1 и N1. Стадия селекции связана с выбором для последующего анализа релевантного сенсорного канала и характеризуется процессной негативностью (PN), характерной для слухового стимула, или селективной негативностью (SN) – для зрительного. Стадия идентификации отражает окончательное определение типа стимула и связана с развитием N2. Стадия категоризации направлена на оценку значимости стимула в данной задаче и отражает активацию *updating* процессов для изменяющегося (P3a) и повторяющегося (P3b) стимулов.

Процессы принятия моторного решения, подготовки и реализации СМИ характеризуются потенциалом готовности и моторным ССП, которые детализированы на уровне lateral readiness potential (LRP) в центральных отведениях (C3 и C4), что позволяет выделить моменты времени, связанные с окончанием сенсорного анализа и принятием моторного решения. LRP генерируется в медиальной части M1 и отражает асимметрию ССП, связанную с двигательной реакцией, выполняемой контралатеральной рукой [2]. Сенсорный LRP (S-LRP) начинается после завершения двигательной селекции и в начале формирования моторной программы, моторный LRP (LRP-R) отражает премоторный и моторный компоненты двигательной реакции [2, 6].

Основным стратегическим элементом взаимодействия перцептивных, центральных и моторных процессов при реакции выбора является степень перекрытия во времени относительно независимых perceptual and response-related stages. Поскольку последовательность perceptual stages завершается стадией категоризации, то для сравнения характера взаимодействия различных стадий реакции выбора были использованы 2 стратегии, в которых ВР наблюдалось до (быстрая) или после (медленная) развития P3, сравнительный анализ которых и явился целью настоящей работы. Для снижения влияния на ССП рефрактерности был использован относительно большой межстимульный интервал (МСИ) длительностью 4 с, а также бимодальная (зрительный и слуховой стимулы) равновероятная реакция выбора.

В обследовании принимали участие 24 студента и научных сотрудника (16 мужчин) Южного федерального университета, средний возраст 22,4 года. Все испытуемые были праворукими и имели нормальное зрение и слух.

В ходе обследования испытуемый располагался в удобном кресле, в освещенной комнате и вы-

полнял тестовую процедуру. В качестве зрительных стимулов применялись вспышки, формирующиеся матрицей (диаметр 5 см) красных светодиодов, яркостью свечения 9 Кд и длительностью 1 мс. Расстояние от источника стимуляции до поверхности глаза составляло 70 см. Слуховыми стимулами служили щелчки длительностью 1 мс и интенсивностью 60 дБ, которые предъявлялись одновременно двумя динамиками, располагающимися в 5 см от каждого уха соответственно.

Каждый испытуемый проходил обследование в длительной непрерывной тестовой процедуре (до 2 ч каждая) в условиях реакции выбора при различении зрительных и слуховых стимулов, предъявляемых с равной вероятностью (0,5). Взгляд фиксировался на вспышке. При реализации сенсомоторных реакций испытуемый в случае предъявления зрительного стимула должен был нажимать большим пальцем правой руки на правую клавишу манипулятора «мышь», при звуковой стимуляции – большим пальцем левой руки на левую клавишу. В каждой тестовой процедуре предъявлялось по 1600 стимулов при среднем МСИ 4 с (с девиацией от среднего значения ±10%).

ЭЭГ регистрировалась в 21 стандартном отведении (система 10–20) с шагом дискретизации 4 мс и частотой пропускания 0,5–70 Гц относительно объединенных ушных электродов. Индифферентный электрод располагался на лбу. ЭЭГ очищалась от артефактов с помощью процедур, реализованных в пакете EEGLAB [8].

Для анализа экспериментальных данных были выделены 2 группы реакций: медленной стратегией (250<ВР<650 мкс) и быстрой (100<ВР<250 мкс). Ложные тревоги (ВР<100 мс) и поздние ответы (ВР>650 мс) были исключены из анализа в связи с их небольшим количеством и высокой вариабельностью.

Оцифрованная ЭЭГ и ВР экспортировались в MATLAB, где получали суммарные сенсорные ССП (100 мс до и 500 мс после стимула). S-LRP вычислялись путем вычитания сенсорных ССП в отведении С3 из СПП в отведении С4 для зрительного раздражения и наоборот – для слухового. Для вычисления LRP-R использовались моторные ССП, регистрируемые относительно момента нажатия на клавишу. Временные параметры LRP оценивались в соответствии с методикой [9]. Для более полной характеристики особенностей СМИ использовалась длительность нажатия, которая оценивалась как разница между моментами отжатия и нажатия клавиши [10].

В настоящей работе было предположено, что в рамках бимодальной равновероятной CR существует две основные стратегии реагирования – быстрая и медленная. Медленная стратегия была характерна для большинства реакций (около 75% реакций), которые возникали после развития P300 и являлись адекватными тестовой процедуре. Быстрая стратегия использовалась существенно реже (около 15% реакций) и была связана с короткими RT, возникающими спонтанно и до возникновения P300.

В условиях медленной стратегии быстрее реализовывалась зрительная СМИ, что, вероятно, было связано с участием в ней: а) ведущей правой руки, существенно влияющей на скорость подготовки и реализации двигательной реакции; б) доминирующей зрительной системы, что соответствует теории зрительного доминирования; в) преобладающей концентрацией произвольного внимания на светодиодной матрице в МСИ (по отчетам испытуемых). В условиях быстрой стратегии, для которой существенную роль играют непроизвольные компоненты внимания, более эффективной была слуховая СМИ, несмотря на участие в ней субдоминантной руки.

Наряду с ВР СМИ также включает в себя время удержания клавиши в нажатом положении (ВУ). При переходе от быстрой стратегии к медленной наблюдался рост ВУ, что согласуется полученными ранее результатами [10], которые демонстрируют пропорциональную зависимость ВУ от RT. При медленной стратегии короткие ВУ были характерны при зрительной СМИ, что может свидетельствовать о преимуществах скоростных характеристик при использовании ведущей руки. При быстрой стратегии наиболее короткие ВУ наблюдались при слуховой СМИ, что подтверждает ее преимущество в условиях преобладания непроизвольных компонентов внимания.

Процесс врабатываемости был характерен для медленной стратегии и характеризовался монотонным увеличением ВР и ВУ в первые 20 минут предъявления последовательности и включал в себя механизмы сенсорного привыкания, элементы автоматизации сенсомоторной реакции [16]. Процесс врабатываемости периодически нарушался появлением спонтанных коротколатентных реакций, количество которых монотонно уменьшалось по мере врабатываемости от 22 до 15%, что может свидетельствовать о снижении возбудимости корковых структур.

Рост МСИ при его девиации не влиял существенно на ВУ, но приводил к укорочению ВР, что лучше было выражено для слуховой СМИ, которая является доминирующей в анализе временных интервалов [17].

Процесс оптимизации СМИ (врабатываемость) был характерен для медленной стратегии и связан с ослаблением N1, соответствующий стадии регистрации стимула [5], что интерпретируется как уменьшение ресурсов внимания, требуемых для первичного анализа стимулов. Одновременно наблюдалось ослабление updating процессов для изменяющегося (P3a) и повторяющегося (P3b) стимулов [11, 12], которые соответствовали стадии категоризации стимула. Для слуховой системы был характерен рост N2, связанный с дополнительной активацией механизмов идентификации целевого стимула [13, 14].

Отсутствие изменений у остальных компонентов ССП свидетельствовало о стабильности

процессов подготовки моторной реакции (CNV), сенсорной чувствительности (C1, P1), классификации текущего стимула (P2).

Слуховой N2 был чувствителен к девиации МСИ, задний фронт которого уменьшался при его росте, что свидетельствует о том, что механизм оценки интервалов времени был связан со стадией идентификации стимула [5], а увеличение МСИ приводило к снижению выраженности данной стадии, за счет появления предупреждающего эндогенного события.

При быстрой стратегии ССП были более выраженными и, вероятно, связаны с повышенной возбудимостью нейронного субстрата, что проявлялось в существенно большей выраженности CNV особенно для зрительного стимула. Одновременно привлекались дополнительные ресурсы внимания (рост N1). При слуховой стимуляции наряду с ростом N1 формировалось дополнительное колебание, которое соответствовало процессной негативности PN, отражающей селекцию слухового канала. Процессы селекции зрительного канала, связанные с компонентом SN, были выражены слабее.

Субкомпоненты P3 при быстрой стратегии для обоих стимулов были выражены намного лучше и появлялись после двигательной реакции. Предполагается, что при коротких ВР стимул анализируется частично, а при длинных – полностью [15, 16], что может свидетельствовать о более выраженных updating процессах (стадия категоризации) при коротких ВР. С другой стороны, предполагается, что при быстрых реакциях P300 чувствительна как к перцептивным, так и моторным процессам [11].

Как показано ранее [10] при коротких ВР моторный ССП возникал только на этапе нажатия клавиши (on-реакция), что соответствует быстрой стратегии. При увеличении ВУ свыше 250 мс дополнительно появляется и увеличивается моторный ССП на момент отжатия (off-реакция), который превращается в самостоятельное событие, притягивающее к себе часть ресурсов внимания, что соответствует медленной стратегии. Следовательно, переход от быстрой стратегии к медленной приводил к росту длительности и усложнению моторного компонента.

Изучение механизмов организации двигательных компонентов реакции выбора связано с анализом соотношений ВР и LRP. В условиях медленной стратегии преимущества зрительной СМИ обеспечивались большей амплитудой и короткими ПЛП S-LRP, а также наличием предварительной коротколатентной активации контралатерального левого полушария. Для слухового стимула, требующего нажатия левой рукой, S-LRP, наоборот, начинался с активации ипсилатерального полушария, смена которой на контралатеральную правополушарную активацию развивалось несколько поздней, что приводило к значительно более позднему достижению правополушарного максимума, характерного для активации левой руки. Сходный уровень предварительной активации левого полушария для слуховых и зрительных стимулов до момента принятия моторного решения, вероятно, был связан с формированием доминантного центра в левом полушарии.

Анализ LRP-R также показал, что премоторной реакции на зрительный стимул предшествовал контралатеральный негативный компонент, а слуховой – ипсилатеральный позитивный компонент. Данные результаты подтверждают версию о доминировании левополушарной (праворукой) интеграции при используемых в данном тесте сенсорных стимулах, которая могла быть следствием праворукости испытуемых и/или результатом «обучения» (автоматизации) при длительных повторениях отдельных попыток.

При быстрой стратегии принятие моторного решения связано со значительной активацией ипсилатеральных полушарий, которые, вероятно с целью снижения данного чрезмерного возбуждения, автоматически трансформировались в активацию контралатеральных гемисфер. Возникновение повторного колебания S-LRP и LRP-R при коротких ВР можно связать с попыткой повторить ответ. При быстрой стратегии S-LRP и LRP-R характеризовались повышением амплитуды и укорочением временных параметров, что может свидетельствовать о более высокой активации моторных структур по сравнению с ситуацией с медленной стратегией.

Таким образом, при повторении СМИ в условиях медленной стратегии в левом полушарии формируется устойчивое взаимодействие между сенсорными системами и латерализованными моторными центрами, связанными с реализацией моторных программ правой и левой рукой. В условиях быстрой стратегии слуховая и зрительная и слуховая СМИ спонтанны (связаны с активацией мотивационных процессов) и самостоятельны (каждая СМИ контролируется своим контралатеральным центром). Кроме того, при медленной стратегии этапы формирования и реализации моторной реакции развиваются последовательно, в соответствии с двухпроцессной моделью [18], при быстрой стратегии – развиваются параллельно, в соответствии с HED model [19].

Литература

1. *Sanders A.F.* Issues and trends in the debate on discrete vs. continuous processing of information // Acta Psychologica. 1990. V. 74. P. 123–167.
2. *Masaki, H., Wild-Wall, N., Sangals, J., & Sommer, W.* The functional locus of the lateralized readiness potential // Psychophysiology. 2004. V. 41. P. 220–230.
3. *Brunia, C.H.M., van Boxtel, G.J.M.* Wait and see // International Journal of Psychophysiology. 2001. V. 43. P. 59–75.
4. *Mento, G.* The passive CNV: carving out the contribution of task-related processes to expectancy // Front. Human Neuroscience. 2013. V. 7. P. 827.
5. *Dien, J., Spencer, R.V., Donchin E.* Parsing the late positive complex: Mental chronometry and the ERP components that inhabit the neighborhood of P300 // Psychophysiology. 2004. V. 41. P. 665–678.
6. *Xu, L., Sommer, W., & Masaki, H.* The structure of motor programming: Evidence from reaction times and

lateralized readiness potentials // Psychophysiology. 2015. V. 52. P. 149–155.

7. *Müller-Gethmann H., Ulrich R., Rinkenauer G.* Locus of the effect of temporal preparation: Evidence from the lateralized readiness potential // Psychophysiology. 2003. V. 40. P. 527–611.

8. *Jung, T.P., Makeig, S., Westerfield, W., Townsend, J., Courchesne, E., & Sejnowski, T.J.* Removal of eye activity artifacts from visual event-related potentials in normal and clinical subjects // Clinical Neurophysiology. 2000. V. 111. P. 1745–1758.

9. *Mordkoff, J.T., & Gianaros, P.J.* Detecting the onset of the lateralized readiness potential: A comparison of available methods and procedures // Psychophysiology. 2000. V. 37. P. 347–360.

10. *Айдаркин Е.К., Кирпач Е.С.* Соотношение времени реакции и длительности удержания кнопки в условиях сенсомоторной интеграции // Валеология. 2011. № 4. С. 87–96.

11. *Polich, J.* Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b // Clinical Neurophysiology. 2007. V. 118. P. 2128–2148.

12. *Schröter, N., & Leuthold, H*. Motor programming of rapid finger sequences: Inferences from movement-related brain potentials // Psychophysiology. 2009. V. 46. P. 388–401.

13. *Näätänen, R., Kujala, T., & Winkler, I.* Auditory processing that leads to conscious perception: A unique window to central auditory processing opened by mismatch negativity and related responses // Psychophysiology. 2011. V. 47. P. 1–19.

14. *Singhal, A., Doerfling, P., & Fowler, B.* Effects of a dual task on N100-P200 complex and the early and late Nd attention waveforms // Psychophysiology. 2002. V. 39. P. 236–245.

15. *McCarthy, G., Donchin, E.* A metric for thought: A comparison of P300 latency and reaction time // Science. 1981. V. 211. P. 77–80.

16. *Sommer, W., Matt, J., & Leuthold, H.* Consciousness of attention and expectancy as reflected in event-releted potentials and reaction times // Journal of Psychology: Learning, Memory and Cognition. 1990. V. 16. P. 902–915.

17. *N`Diaye, K., Ragot, R., Garnero, L., & Pouthas, V.* What is common to brain activity evoked by the perception of visual and auditory filled duration? A study with MEG and EEG co-recordings // Cognitive Brain Research. 2004. V. 21 P. 250–268.

18. *Klapp S.T.* Reaction time analysis of two types of motor preparation for speech articulation: Action as a sequence of chunks // Journal of Motor Behavior. 2003. V. 35. P. 135–150.

19. *Rosenbaum D.A., Hindorf V., Munro E*. Scheduling and programming of rapid finger sequences: Test and elaborations of the hierarchical editor model // Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance. 1987. V. 113. P. 372–393.

Значение меж- и внутрикультурных ментальных вариаций

Ю.И. Александров[1], В.В. Апанович[2]

[1]ИП РАН, ВШЭ, МГППУ; e-mail: yuraalexandrov@yandex.ru
[2]ИП РАН, МГППУ; e-mail: apanovitschvv@yandex.ru

Известно, что характеристики ментальности имеют культурную специфику (Александров, Александрова, 2009; Александров, Кирдина, 2012; и др.). Одной из ключевых психологических характеристик, связанных с ментальностью, является аналитичность-холистичность. Аналитичность и холистичность рассматриваются как типы ментальности (Апанович и др., 2017; Знаков, 2016), присущие разным культурам – преимущественно западным (США, Западная Европа) и не западным (Южная Корея, Япония, Китай). Аналитическое мышление предполагает смещение внимания на объект как таковой, изучение его внутренней структуры и законов. Холистическое мышление предполагает больший учёт социального контекста, акцент на взаимосвязях между объектами и явлениями.

Известно, что различия в ментальности имеются как между культурами (см. работы Г. Хофстеде, Р. Нисбетта), так и у индивидов внутри культур (Na et al., 2010; Tahlem et al., 2014 и др.). В том числе в ряде работ показаны внутрикультурные различия организации действий между аналитичными и холистичными субъектами (Apanovich et al., 2018a; Апанович и др., 2016; Kitayama et al., 2011; Hedden et al., 2008), в том числе в наших экспериментах по критерию мозговой активности (Апанович и др., 2016; Apanovich et al., 2018b; Bacha-Trams et al., 2018). Выявлено, что при решении задач вариативность мозгового обеспечения поведения по-разному соотносится с ментальностью субъектов в зависимости от экспериментальных условий. На российской выборке вариативность компонентов ССП была выше у холистичных субъектов по сравнению с аналитичными; также было показано, что для холистичных субъектов эта вариативность достигала максимума при конкурентном решении задачи простого выбора (различение столбиков разной высоты), нежели при кооперативном. Для аналитичных субъектов вариативность компонентов ССП была выше при кооперативном решении, нежели при конкурентном (Апанович и др., 2016; Apanovich et al., 2018b). Ранее нами было описано соответствие типа ментальности и предпочтительного типа социального взаимодействия (Alexandrov, Kirdina, 2013). На финской выборке совместно с финскими коллегами нами было показано, что при просмотре видео, предполагающего моральную оценку, межсубъектная корреляция активации мозга при регистрации фМРТ была достоверно ниже у аналитичных субъектов по сравнению с холистичными, т. е. более вариативная картина активности отмечалась в этом случае у аналитичных субъектов (Bacha-Trams et al., 2018). Основываясь на наших результатах и данных других авторов (Hedden et al., 2008 и др.), мы полагаем, что важным фактором разной связи вариативности активности с ментальностью в сравниваемых ситуациях является тип задачи: в первом случае она была более аналитической, а во втором – холистической. Важность этого фактора определила наши дальнейшие усилия, направленные на разработку наборов задач, классифицируемых как аналитические и холистические по формальным основаниям (Апанович и др., 2018).

Нами были предложены два формальных критерия различения этих типов задач. Первым критерием является возможность в ходе «универсального» решения вычленять отдельные этапы (аналитическая задача), или же оптимальным способом решения является симультанное схватывание условий задачи (холистическая задача). Вторым критерием выступает количество возможных альтернатив решения, с которыми возможно работать в ходе решения задачи. При аналитической задаче количество альтернатив сравнительно невелико; при холистической – количество элементов несчётно, слишком велико, или их полный перебор в принципе невозможен.

С учетом этих критериев были сконструированы наборы аналитических и холистических задач. Аналитические задачи включают в себя задачи, требующие применения аристотелевской формальной логики. Холистические задачи требуют принятия моральных решений; ассоциативного мышления, а также включают анаграммы, предполагающие симультанность решения. Нами было показано, что аналитичные субъекты (идентифицированные с помощью опросника Апанович и др., 2017) успешнее решают аналитические задачи, а холистичные – холистические (Apanovich et al., 2018a).

Ранее (Александров, Александрова, 2010; Alexandrov, 2009; Alexandrov, 2015) нами были выдвинуты аргументы в пользу того, что люди с разными типами ментальности могут быть комплементарными при совместном решении задач, в частности потому, что акт познания включает холистическую и аналитическую фазы. Показано, что коллективный интеллект малых групп (*c*), измеряемый по критерию решения разных задач (Wooley et al., 2010), не является простой суммой индивидуальных интеллектов, но проявляет связь с составом группы.

Мы проверяли предположение о том, что успешность коллективного решения задач зависит от разнообразия, точнее, степени взаимодополнительности индивидов, входящих в группу. Действительно, в пилотажных исследованиях нами было показано, что все типы задач (аналитические и холистические) быстрее решаются в том случае,

когда решающая их группа составлена из комплементарных пар (т.е. из аналитичного и холистичного субъекта), нежели гомогенные пары.

Таким образом, можно говорить о проявлении вариативности ментальностей как на внутри-, так и на межкультурном уровне. Есть основания предполагать, что ментальная вариативность, поддерживаясь эволюцией, может обеспечивать реализацию принципа комплементарности при взаимодействиях внутри и между сообществами и тем самым повышать эффективность этих взаимодействий. Это соотносится с представлениями о том, что изоляция популяции от взаимодействия с другими культурами приводит к нежизнеспособности культуры, и напротив, большую адаптивность популяций, характеризующимися более активными миграционными процессами (Culotta, 2010; Powell et al., 2009). Также существуют представления о том, что внутри культуры сообщество является более стабильным, если в нём есть продуктивная взаимодополняемость: «Взаимная помощь, как частный случай сотрудничества, возникает как производная индивидуальных различий – ограниченность и специфичность индивидуальных возможностей делает выгодной кооперацию» (Асмолов и др., 2013).

Исследование поддержано РФФИ (проект № 18-013-01098).

Литература

Александров Ю.И., Александрова Н.Л. Комплементарность культуроспецифичных типов познания // Вестник Моск. ун-та. Серия 14. Психология. 2010. №1. С. 22–35.

Александров Ю.И., Кирдина С.Г. Типы ментальности и институциональные матрицы: мультидисциплинарный подход // Социологические исследования. 2012. Т. 38. С. 3–12.

Апанович В.В., Безденежных Б.Н., Знаков В.В., Самс М., Яаскелайнен И., Александров Ю.И. Различия мозгового обеспечения индивидуального, кооперативного и конкурентного поведения у субъектов с аналитическим и холистическим когнитивными стилями // Экспериментальная психология. 2016. Т. 9. № 2.

Апанович В.В., Знаков В.В., Александров Ю.И. Апробация шкалы аналитичности-холистичности на российской выборке // Психологический журнал. 2017. Т. 38. № 5. С. 80–96.

Апанович В.В., Тищенко А.Г., Арутюнова К.Р., Знаков В.В., Александров Ю.И. Критерии различения аналитических и холистических задач // Психология человека как субъекта познания, общения и деятельности / отв. ред. В.В. Знаков, А.Л. Журавлёв. М. : Изд-во «Институт психологии РАН», 2018.

Асмолов А.Г., Шехтер Е.Д., Черноризов А.М. Историко-эволюционный синтез: взаимная помощь как фактор эволюции // Вопросы психологии. 2013. №6. С. 3–13.

Знаков В.В. Психология понимания мира человека. М. : Изд-во «Институт психологии РАН», 2016.

Alexandrov Y.I. Global science and its culture-specific components // Liberalizing research in science and technology. Depart. Human. Soc. Sci. Indian Inst. Technol. Kanpur 208016, India. 2009. P. 3–4.

Alexandrov, Yu., Kirdina, S. Toward integration of social mental and institutional models: systemic approach // Montenegril J. Econ. 2013. 9 (1). P. 7–15.

Aleksandrov Yu.I. Cognition as systemogenesys // Anticipation: Learning from the Past: The Russian/Soviet Contributions to the Science of Anticipation. Springer; Nadin M. (ed.). 2015. V. 25. P. 193–220.

Apanovich V.V., Tischenko A.G., Arutyunova K.R., Znakov V.V., Alexandrov Yu.I. Complementarity of holistic and analytical mentalities and task type as factors of cooperative problem solving // Восьмая международная конференция по когнитивной науке : тезисы докладов. Светлогорск, 18–21 октября 2018 г. ; отв. ред. А.К. Крылов, В.Д. Соловьев. М. : Изд-во «Институт психологии РАН», 2018b.

Apanovich V.V., Bezdenezhnykh B.N., Sams M., Jääskeläinen I.P., Alexandrov Yu.I. Event-related potentials during individual, cooperative, and competitive task performance differ in subjects with analytic vs. holistic thinking // International Journal of Psychophysiology. 2018b. Т. 123. С. 136–142.

Bacha-Trams M. et al. A drama movie activates brains of holistic and analytical thinkers differentially // Social cognitive and affective neuroscience. 2018. V. 13. No 12. P. 1293–1304.

Culotta E. Did Modern Humans Get Smart Or Just Get Together? // Science. 2010. V. 328. P. 164.

Hedden T., Ketay S. Aron A., Markus H.R., Gabrieli J. Cultural influences on neural substrates of attentional control // Psychological science. 2008. Vol. 19. No. 1. P. 12–17.

Kitayama S., Uskul A. Culture, Mind, and the Brain: current evidence and future directions // Annual Review of Psychology. 2011, 62. P. 419–449.

Na J., Grossmann I., Varnum M., Kitayama S., Gonzalez R., Nisbett R. Cultural differences are not always reducible to individual differences // PNAS. 2010. Vol. 107. № 14. P. 6192–6197.

Powell A., Piccoli G., Ives B. Virtual teams: a review of current literature and directions for future research // ACM SIGMIS Database: the DATABASE for Advances in Information Systems. 2004. Vol. 35. No. 1. P. 6–36.

Talhem T., Zhang X., Oishi S., Shimin C., Duan D., Lan X., Kitayama S. Large-Scale Psychological Differences within China Explained by Rice Versus Wheat Agriculture // Science. 2014. Vol. 344. P. 603–608.

Woolley A.W. et al. Evidence for a collective intelligence factor in the performance of human groups // Science. 2010. V. 330. No. 6004. P. 686–688.

Эйлерова характеристика непланарностей в топологии психологических структур

И.О. Александров[1], Н.Е. Максимова[1], Ю.А. Заварнова[2], В.С. Свиридов[3], Д.С. Турубар[4]

[1]Институт психологии РАН, г. Москва, e-mail: almax2000@inbox.ru
[2] ГАУГН, г. Москва, e-mail: juliazavarnova@mail.ru
[3]Федеральный медицинский исследовательский центр психиатрии и наркологии МЗ РФ, Московский НИИ психиатрии, e-mail: psyastral@mail.ru
[4]Национальный научно-практический центр детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Дм. Рогачёва, г. Москва, e-mail: dturubar@gmail.com

Исследование топологии психологических структур (ПС) позволит выделить варианты сложности организации ПС и связать их с содержательными характеристиками психологического взаимодействия.

Неоднородная семантическая сеть, представляющая ПС, которая сформирована в определенной институционализированной предметной области (ИПО), описывается как множество компонентов, фиксирующих информационные модели взаимодействий индивида (носителя ПС) с различными составляющими ИПО. Компоненты ПС связаны отношениями, по крайней мере, семи типов (группа диахронических отношений следования строгого и нестрогого порядка, а также образующих петли и циклы, группа синхронических отношений, обозначенных логическими операторами AND, XOR и IOR) [5]. Целостная сеть, представляющая ПС, содержит составляющие, которые обладают различной топологией. Так, кроме безмасштабных подмножеств сети, образованных, например, отношениями следования, AND и XOR, выделяются локально масштабированные подмножества сети, образованные отношениями IOR. В подмножествах сети, сформированных синхроническими отношениями, выявлены группы вершин сети (компонентов ПС), которые описываются непланарными графами K_5 и $K_{3,3}$ [5, 6]. Поскольку непланарные графы укладываются без пересечений на торической поверхности, топология ПС на непланарных подмножествах приобретает размерность тора, т. е. для такой локальной области ПС эйлерова характеристика $\chi = 0$ [9, 10].

Установлено, что группы компонентов, связанные как графы K_5 и $K_{3,3}$, распределены в популяции неравномерно. Выборка участников исследования при помощи кластерного анализа была разделена на группы, с различной степенью успешности решавшие задачи методики «Ход шахматного коня» (ХШК); эти группы различались также по эффективности в стратегической игре «Крестики-нолики на поле 15×15» (ХО), так что одни и те же участники исследования были наиболее успешны или, напротив, наименее успешны одновременно в двух тестовых методиках. В ПС, реконструированной для ИПО «Крестики-нолики на поле 15×15», во всех группах участников исследования были найдены непланарные множества компонентов, причем однодольные графы K_5 достоверно чаще присутствовали в ПС наименее успешных групп, а двудольные $K_{3,3}$ – в ПС наиболее успешных [5, 6]. Непланарные графы $K_{3,3}$ достоверно чаще встречаются в ПС у участников исследования, которые наиболее успешны в стратегической игре двух партнеров, при этом известно, что сама возможность взаимодействия игроков обеспечивается формированием кроссиндивидуальной (надиндивидуальной) ПС [3, 4]. На этом основании высказано предположение, что группы компонентов ПС, содержащие двудольные непланарные графы $K_{3,3}$, связаны с организацией кроссиндивидуальных составляющих ПС.

Цель работы: формально описать варианты непланарных составляющих ПС, установить их соотношение с особенностями выполнения стратегической игры ХО и решения задач ХШК, а также характеристиками межиндивидуальных отношений.

Гипотезы исследования: (1) в организации ПС присутствуют группы компонентов, описываемых непланарным двудольным графом, соответствующим «двухдырочному» тору, т. е. ПС содержат локальные подмножества с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$; (2) количество групп с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ снижается у лиц, наименее успешных в решении задач ХШК и достигает минимума у лиц с расстройствами шизофренического спектра (для которых характерен дефицит в социальных взаимодействиях).

Методика

В исследовании приняли участие 158 чел. Популяционную выборку составили студенты московских вузов 118 чел. (66 женщин, 52 мужчины, 17–40 лет, медиана = 21 год). Пациенты с расстройствами шизофренического спектра – 40 чел. (18 женщин, 22 мужчины, 18–59 лет, медиана = 30 лет), были отобраны лечащим врачом и клиническим психологом (20 чел. из стационара, 20 – на амбулаторном лечении) в соответствии с диагнозами (по МКБ-10): F20 – шизофрения – 21 чел., F21 – шизотипическое расстройство – 10 чел., F25 – шизоаффективное расстройство – 9 чел.

Участники исследования, полностью прошедшие процедуру формирования компетенции в стратегической игре ХО (300 ходов в последовательных играх) и хотя бы приступившие к решению задач ХШК (популяционная выборка 118 чел., выборка пациентов – 23 чел.), были разделе-

ны на 7 групп (0–6). Пациенты, решавшие все задачи всех серий ХШК, составили группу 1; отказавшиеся от решения этих задач на каком-либо этапе после получения инструкции составили группу 0. Популяционная выборка разделена на 5 групп, по использованию одного из 5 вариантов семантики решения задач ХШК [5, 6], так, что наиболее успешные участники составили группу 6, а наименее успешные (отказавшиеся от решения, использовавшие семантику-1) – группу 2. Группы 0 и 1 (выборка пациентов) и 2 и 3 (популяционная выборка) аналогичны по результатам кластеризации, но созданы с целью разделения участников из популяционной выборки и пациентов. Четыре пациента, вошедшие в группы 3–6, были исключены из анализа. (Подробное описание разбиения выборки на группы см. в [5, 6].)

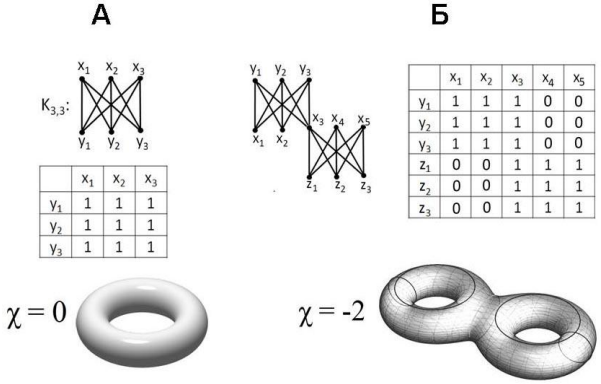


Рис. 1. Непланарные составляющие ПС с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$ (А) и $\chi = -2$ (Б). На А и Б – представление этих составляющих в виде графов, в форме матриц смежности и в графике (на А – однодырочный тор, на Б – двухдырочный)

Для оценки характеристик межиндивидуальных отношений у части участников популяционной выборки (40 чел.) использовали методику ДМО Л.Н. Собчик [8].

Непланарные подграфы выделяли на сетях, представляющих ПС, образовавшихся при формировании компетенции в игре «Крестики-нолики на поле 15×15», используя алгоритмы, описанные в [1, 5]. Алгоритм поиска непланарностей в работе [5, 6] был построен в буквальном соответствии с теоремой Понтрягина – Куратовского [9] – определяли графы, содержащие подграфы K_5 или $K_{3,3}$. В данной работе (в отличие от [5, 6]) определяли не количество связных подмножеств сети, содержащих непланарный подграф $K_{3,3}$ (см. рис. 1, А), а количество пар двудольных графов $K_{3,3}$, связанных за счет пересечения по одной вершине и образующих «двухдырочные» торы (см. рис. 1, Б, пересечение двух подграфов $K_{3,3}$ по вершине *x*3). Оценивали также и количество «однодырочных» торов (см. рис. 1, А). Для каждого участника исследования оценивали количество множеств вершин подмножества сети, образованной отношениями XOR с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ и $\chi = -2$, максимальные значения суммы единичных элементов матрицы смежности, представляющей подграф сети (т. е. количество отношений XOR в данной матрице), и общую сумму для всех выявленных непланарных групп. Данные обрабатывали с помощью пакета *SPSS Statistics* 17.0.

Результаты

Подмножества компонентов ПС, связи которых образуют непланарные графы, обладающие эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ (рис. 1, Б), были выявлены в ПС участников исследования во всех группах в количестве от 0 до 5. В группе 6 такие подмножества компонентов были найдены у всех участников исследования, в других группах популяционной выборки их количество градуально снижается (в группе 3 – у 44 испытуемых из 61, у 72%) и достигает минимума в группах пациентов: в группе 1 – у 5 из 9 чел. (55%), а в группе 0 – у 5 из 12 (41%). Заметим, что присутствие в ПС непланарных графов, обладающих эйлеровой характеристикой $\chi = 0$ (рис. 1, Б), распределено принципиально иначе – они отсутствуют только в группах участников исследования, отказавшихся от решения задач ХШК – 1 (выборка пациентов) и 2 (популяционная выборка).

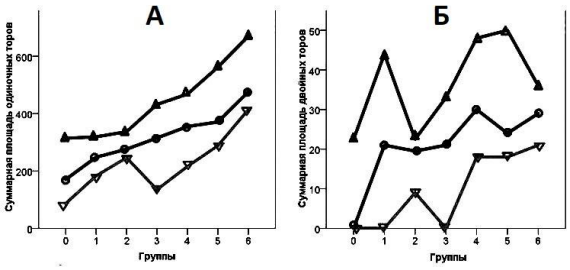


Рис. 2. Суммарное количество отношений XOR в непланарных составляющих ПС с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ (А) и $\chi = -2$ (Б) в разных группах испытуемых. По оси абсцисс – группы 0–6. По оси ординат – сумма единичных элементов всех матриц смежности (количество отношений XOR) для каждого участника исследования. Кружки – медианы распределений для каждой группы, треугольники «вниз» – 1-й квартиль, треугольники «вверх» – 3-й квартиль

На рис. 2 показаны распределения сумм единичных элементов матриц смежности для каждого участника исследования, описывающих непланарности с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ (рис. 2, А), и $\chi = -2$ (рис. 2, Б), по всем группам. Только для «двухдырочных торов» медианные значения этих величин достигают нуля в группе 0 (выборка пациентов). Показано градуальное снижение сумм единичных элементов матриц смежности для непланарностей с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ и $\chi = -2$ (тест Джонкхира-Терпстра, 7 уровней, для однодырочных торов: статистика *Std J-T* = 3.896, $p = 9.76*10^{-5}$; для двухдырочных торов: статистика *Std J-T* = 2.987, p = .,003). Если исключить группу 0, в которой количество торов двух видов резко снижается, то градуальность снижения сумм единичных элементов матриц смежности сохраняется (тест Джонкхира-Терпстра, 6 уровней, для однодырочных торов: статистика *Std J-T* = 3.148, p = ,002; для двухдырочных торов: статистика *Std J-T* = 2.023, p = ,043).

Организация непланарных групп с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ (сформированных в ПС при овладении компетенцией в стратегической игре ХО) показала достоверную связь с временем решения сложных задач методики ХШК (трехходовые и четырехходовые задачи), но не с временем выбора хода в игре ХО. Это установлено с помощью множественного регрессионного анализа, зависимые переменные – медианные значения времени решения задач, независимые – характеристики непланарных групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ (количество и сумма единичных элементов всех матриц смежности) для каждого участника исследования, процедура BACKWARD. Характеристики четырех регрессионных моделей времени решения для разных серий заданий ХШК: $df = 2$; $.474 \geq R \geq .231$; $.211 \geq R^2_{adj} \geq .038$; $16.39 \geq F \geq 3.44$; $.035 \geq p \geq 5.64 \cdot 10^{-7}$. Регрессионные модели времени решения задач ХШК, независимыми переменными которых были аналогичные параметры непланарных групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$, не достигали уровня значимости.

Регрессионная модель времени выбора хода в стратегической игре ХО, независимыми переменными которых были свойства непланарных групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, была не значима. Значимая связь времени выбора хода в игре была показана для свойств непланарных групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$: $df = 1$; $R = .361$; $R^2_{adj} = .123$; $F = 19.58$; $p = 2.01 \cdot 10^{-5}$.

Проведен факторный анализ набора переменных, характеризующих успешность стратегической игры (соотношение выигрышей и проигрышей), время и параметры набора альтернатив выбора хода, энтропийную меру сложности организации ПС в стратегической игре [2], оценки успешности решения задач методики ХШК (количество правильных решений, решения задач не с первой попытки, количество нерешенных задач, время, затраченное на решение задач с четырьмя ходами и задач с блоками (см. [5, 6]) и оценки сумм единичных элементов матриц смежности для непланарных групп с эйлеровыми характеристикой $\chi = 0$ и $\chi = -2$). Характеристики факторного решения: матрица 135×15; метод главных компонент, вращения не использовали; KMO = .658; Det = .002; тест сферичности Бартлетта $\chi^2 = 638.93$; выделено 6 факторов, объясняющих 76,21% дисперсии. Сумма единичных элементов матриц смежности для непланарных групп с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$ с весом .837 вошла в фактор II (17.66% дисперсии) совместно с оценками количества правильно решенных задач методики ХШК (.417), времени выбора хода (.518) и количества устраненных альтернатив при выборе хода в игре ХО (.577), энтропийной оценкой сложности организации ПС, фиксирующей компетенцию в стратегической игре ХО (.796). Переменная, представляющая общее количество отношений XOR для непланарных групп с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ с весом –.489 вошла в фактор IV (9.88% дисперсии) совместно с оценками количества альтернативных вариантов при выборе хода (.636) и количеством альтернатив, устраненных при выборе хода (.500).

Следует заметить, что для непланарных групп с эйлеровыми характеристикой $\chi = -2$ выявлена значимая парная корреляция с энтропийной оценкой сложности организации ПС: для количества подмножеств сети с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, $df = 134$, $R\text{s} = .314$, $p = 2.17 \cdot 10^{-4}$, для оценки сумм единичных элементов всех матриц смежности для групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, $df = 134$, $R\text{s} = .205$, $p = .017$.

Выявлена достоверная связь между параметрами непланарных групп с эйлеровой характеристикой только $\chi = -2$ (но не с $\chi = 0$) и оценкой межиндивидуальных отношений (методика ДМО Л.Н. Собчик), по октанту 1 («властный-лидирующий тип межличностных отношений»): для количества подмножеств сети с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, $df = 40$, $R\text{s} = .375$, $p = .017$, для оценки сумм единичных элементов всех матриц смежности для групп компонентов с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, $df = 40$, $R\text{s} = .501$, $p = .001$.

Обсуждение результатов

Результаты работы показывают, что с приобретением компетенции формируются составляющие ПС с локальными топологическими особенностями неоднородной семантической сети. Эти составляющие обладают свойствами непланарности, т. е. не могут быть уложены на плоской поверхности без самопересечения. Согласно теореме Понтрягина – Куратовского [9], графы, содержащие в качестве подграфа двудольный граф $K_{3,3}$, могут быть уложены на торической поверхности (на однодырочном торе). Топологически такая группа связанных компонентов ПС имеет эйлерову характеристику $\chi = 0$. Организация сети, не имеющая признаков непланарности, по-видимому, обладает либо плоской, либо сферической топологией и имеет эйлерову характеристику $\chi = +2$. В наиболее примитивных, линейно организованных областях сети эта характеристика должна равняться единице.

В работе показано, что в организации сети, представляющей ПС, формируются также пары двудольных графов, образующие двойные, «двухдырочные» торы. Эти локальные области сети имеют эйлерову характеристику $\chi = -2$.

Таким образом, пространство ПС имеет «кусочную» топологию; разные области имеют различные эйлеровы характеристики: +2, +1, 0, –2.

В данной работе рассмотрено лишь подмножество неоднородной сети, образованное синхроническими отношениями XOR, вносящими запреты на одновременную актуализацию компонентов ПС. Если группы компонентов, содержащие двудольный граф $K_{3,3}$, уложенные на поверхность однодырочного тора без самопересечений (взаимных помех), синхронно согласовывают активность ***двух*** подмножеств компонентов (описанных как доли

графа), то в группе компонентов организованной как два непересекающихся подмножества (см. рис. 1, Б, первое подмножество y1, y2, y3; второе подмножество z1, z2, z3), связанные через подмножество x1, x2, x3, x4, x5 (уложенные на поверхности двухдырочного тора), возникают новые степени свободы в реализации синхронных запретов актуализации компонентов ПС. Такая качественно особая организация может быть рассмотрена как координирующая.

В работе описаны непланарные группы компонентов ПС, сформированной в ИПО «Стратегическая игра». Важно заметить, что выявлены статистически достоверные связи характеристик этих непланарных групп компонентов с формированием и реализацией иной ПС, сформированной в ИПО «Ход шахматного коня». Учитывая представления о процессах формирования ПС, сформулированные на основе положений системно-эволюционной парадигмы [4], можно предположить, что сходство топологии ПС, сформированных при взаимодействии с различными ИПО обеспечивается процессами ауторепликации ПС, репликаторами которых и, возможно, аттракторами служат топологические организации, частично проявившиеся в выявленных в данной работе локальных торических подмножеств сети с эйлеровыми характеристиками $\chi = 0$ и $\chi = -2$.

Результаты работы показывают, что непланарные группы с эйлеровыми характеристикам $\chi = 0$ и $\chi = -2$ качественно различны не только топологически, но и по их содержательной специфике в рамках целостной организации ПС. Судя по полученным парным корреляциям, а также по результатам множественной регрессии и факторного анализа, непланарные группы с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$ (однодырочные торы) связаны преимущественно с реализацией конкретных взаимодействий с ИПО, с процессами выбора из сформированного набора альтернатив, как устранением степеней свободы. Для более сложно организованных групп компонентов – непланарных групп с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ (двухдырочные торы) – выявлены связи с процессами *создания* наборов альтернатив для последующей их селекции. Именно группы с такой эйлеровой характеристикой делают возможной координацию одновременной актуализации несовместимых альтернатив. Принципиально важной представляется связь таких групп компонентов с характеристиками межиндивидуальных отношений. Можно предполагать, что группы компонентов, организация которых топологически гомеоморфна двойному (двухдырочному) тору, могут быть составляющими кроссиндивидуальных ПС, обеспечивающих возможности межиндивидуальных взаимодействий (см. [3, 4]).

В пользу такого предположения говорит также и выявленный дефицит непланарных образований с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$, т. е. двухдырочных торов, в выборке пациентов, особенно в группе 0. Важно, что для непланарных образований с эйлеровой характеристикой $\chi = 0$, для однодырочных торов выраженное снижение в группе пациентов не является столь резким, как для двухдырочных. Поскольку нарушение в сфере социальных взаимодействий входит в перечень наиболее важных симптомов шизофрении, именно радикальное снижение темпа формирования непланарных образований с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ может служить возможным претендентом на роль маркера этого спектра расстройств.

Исследование выполнено при помощи гранта РФФИ (проект №18–00–00245 КОМФИ), Институт психологии РАН.

Литература

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

2. *Александров И.О., Максимова Н.Е.* Оценка сложности организации структуры индивидуального знания // Третья международная конференция по когнитивной науке. Тезисы докладов. Т. 1. М. : Художественно-издательский центр, 2008. С. 181–182.

3. *Максимова Н. Е., Александров И. О.* Компоненты психологического взаимодействия и возможность их операционализации // Человек, субъект, личность в современной психологии ; отв. ред. А. Л. Журавлев, Е. А. Сергиенко; материалы конференции, т. 3. М. : Институт психологии РАН, 2013. С. 161–164.

4. *Максимова, Н.Е., Александров И.О.*. Возможная траектория эволюционного развития психологии. Часть II. Организация предметной области психологии // Психол. журн. 2016. Т. 37, №2. С. 5–18.

5. *Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С*. Дифференциация и организация психологических структур при взаимодействии индивида с новыми предметными областями. Часть I. Свойства аутореплицирующихся структур и их операционализация // Психол. журн. 2019. Т. 40, № 1. С. 15–27.

6. *Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С.* Дифференциация и организация психологических структур при взаимодействии индивида с новыми предметными областями. Часть II. Эмпирические доказательства существования аутореплицирующихся структур // Психол. журн. 2019. Т. 40, № 2. С. 47–65.

7. *Осипов Г.С.* Приобретение знаний интеллектуальными системами. М. : Наука, 1997.

8. *Собчик Л.Н.* Диагностика межличностных отношений ; практическое руководство к традиционному и компьютерному вариантам теста. М. : Боргес, 2010.

9. *Харари Ф.* Теория графов. М. : Мир, 1973.

10. *Шашкин Ю.А.* Эйлерова характеристика. М. : Наука, 1984.

Зрительные агнозии и двойственность зрительного опознания

Н.Ш. Александрова

Sprachbrücke e.V., г. Берлин, Германия

Данная работа содержит предположение о мозговой организации и закономерностях функционирования зрительного восприятия человека на уровне зрительного гнозиса. Основанием для работы являются собственные наблюдения пациентов с односторонними, подтвержденными на КТ органическими поражениями мозга в процессе восстановительной терапии, исследование становления способности узнаваемо изображать объекты, а также анализ литературы.

Чтобы воспринять объект с помощью зрения, недостаточно его увидеть, объект нужно опознать. Зрительный гнозис (когнитивная стадия обработки информации) обеспечивается вторичными, ассоциативными полями височно-теменно-затылочных отделов мозга обоих полушарий, функции вторичных полей латерализованы [1]. Зрительные агнозии могут быть приобретенными, которые возникают, чаще всего, в результате органических поражений мозга. Активно изучаются в настоящее время врожденные зрительные агнозии, но многие вопросы, касающиеся механизмов развития данных состояний и диагностики, остаются неясными [2–5].

Кок (1967) выдвигает положение о существовании гностических функциональных систем восприятия и называния цвета, пространственных отношений, предметов, имеющих представительство в обоих полушариях, в симметричных областях. Каждому гнозису и праксису правого полушария соответствует парная разновидность гнозиса и праксиса с речевыми надстройками в левом полушарии. В работах Кок в порядке дискуссии выдвигаются положения о правополушарной отдельной системе опознания лиц и левополушарной – букв и отдельно цифр. Достаточно распространенной также является концепция об организации зрительного гнозиса как многоканального аппарата, перерабатывающего одновременно разнообразную зрительную информацию [6]. Глезер [7] приводит ряд исследований, подтверждающих модульную модель. Все эти представления отражают разные грани реальной организации зрительного гнозиса. Современные нейрофизиологические исследования ставят вопрос о существовании специализированного механизма восприятия лиц, отличного от восприятия других объектов [8–11], исследуется сохранность буквенного гнозиса при лицевой агнозии и лицевого опознания при алексии [12–14], предпринимаются попытки сравнения агностического видения лиц с периферическим зрением здоровых людей [15], на здоровых испытуемых исследуются особенности опознания лиц и объектов [16]. Как утверждается в одной из последних работ на тему зрительных агнозий, «…столетие исследований дало лишь рудиментарный отчет о функциональном ущербе, лежащем в основе этого дефицита» [15]. В целом можно констатировать, что сложившейся теории зрительного опознания в настоящее время еще не существует.

В данной работе основное внимание сфокусировано на двух формах зрительных агнозий – лицевой и буквенной.

Несколько предварительных рассуждений…

О зрительных стимулах и задачах опознания.

Зрительные стимулы различаются степенью своей уникальности или индивидуальности. Природные объекты – люди, животные, растения, ландшафты – всегда уникальны. Рукотворные предметы могут быть как уникальными, единичными в своем роде (произведения искусства), так и серийного производства. В последнем случае различия приобретаются в процессе амортизации.

При опознании объектов могут решаться разные задачи – от отнесения объекта к какой-либо категории (это – дом, это – лицо человека) или к группе внутри категории (это – деревянный дом, это – женское лицо) до опознания индивидуальных качеств или индивидуальной принадлежности объектов (это – мой дом, это – фото моего врача).

Узнать человека «в лицо» – это всегда опознание индивидуальных качеств, узнавание предметов в повседневной жизни – это, чаще всего, отнесение их к какой-то категории, узнать букву или цифру – это всегда опознание схемы при максимальном отвлечении от индивидуальных особенностей шрифта.

О способности рисовать портреты и схематично изображать предметы.

При зрительных агнозиях у пациентов опознание реалистичных и схематичных изображений может нарушаться изолированно, а также может страдать способность схематично изображать знакомые предметы. Схемы предметов играют важную роль в компенсации некоторых форм зрительных агнозий.

Рисование, т. е. искусство изображать существующие и воображаемые предметы, складывается из двух разных функциональных возможностей человека: воссоздания индивидуальных качеств объектов и изображения объектов в виде обобщенных схем. Способность отобразить на рисунке индивидуальные особенности лица и общего облика человека встречается редко и является основой изобразительного творчества. В то же время нарисовать узнаваемо простейшие предметы могут все взрослые здоровые люди. При этом происходит отвлечение от индивидуальных особенностей объекта, и подчеркиваются признаки, важные функционально или необходимые для отнесения объекта к определенной категории: ручка у чашки сбоку, у ведра – сверху, шея у жирафа, хобот у слона и т. п.

Когда в онтогенезе происходит становление способности узнаваемо изображать предметы? Для ответа на этот вопрос было обследовано 126 детей перед поступлением в первый класс общеобразовательной школы [17]. Детям 5–7 лет предлагалось нарисовать две серии рисунков: 1) *чашку, ведро, кастрюлю*; 2) *слона, жирафа, верблюда*. Предметы отличаются друг от друга четкими признаками: посуда – местом ручки или ручек, животные – наличием хобота, горбов, длинной шеи. В то же время данные предметы не предлагаются детям для рисования слишком часто, как, к примеру, *дом* или *человек*. Поэтому предполагалось, что детям при рисовании придется самим конструировать схему предметов, а не извлекать готовую схему из памяти. Предварительно в беседе выяснялась степень знакомства детей с данными предметами и животными. Большинство детей говорили, что они не умеют рисовать животных. Проводящий исследование в этом случае пояснял, что животных нужно рисовать просто, но так, чтобы можно было их узнать, т. е. детей подводили к схематичному изображению.

Задание считалось выполненным, если объекты на рисунке можно было узнать. Полностью справились с заданиями 49 детей (5 лет – 3 ребенка, 6 лет – 26 детей, 7–8 лет – 20 детей), в рисунках у 71 ребенка не все предметы могли быть опознаны, эти дети находились на разных стадиях формирования способности узнаваемо изображать предметы. Все дети, умеющие читать, полностью справились с заданиями.

Что стоит за схематичным рисунком?

Представленное исследование показывает, что к началу школьного обучения дети в основном приобретают способность узнаваемо изображать предметы, и это происходит примерно в то время, когда ребенок начинает читать. Выучить и называть отдельные буквы, а также узнавать отдельные короткие слова как целостные конфигурации ребенок может очень рано, с двух лет. Но в раннем возрасте буква или целое слово воспринимаются как картинки (правополушарное опознание) и, несмотря на то что ребенок знает названия букв, читать он еще не может. Значительно позже – в 5, 6 или 7 лет – ребенка можно научить читать полноценно, складывая из букв слоги и слова; с этого момента буква становится фонетически и графически значимой. То же самое можно наблюдать и по отношению к предметам: ребенок, начав говорить, называет предметы, а вот узнаваемо изобразить их он научится, как мы показали, значительно позже. По мере роста и развития ребенка через предметно-практическую деятельность происходит «…выделение (анализ) и структурирование (синтез) функциональных признаков (функциональный признак – признак предмета, связанный с его функциональным назначением). Таким образом, «левополушарное» зрительное восприятие этого уровня представляет собой, по существу, топологическую схему предмета в определении Н.А. Бернштейна, т. е. афферентацию для смыслового манипулирования с ним» (18:41). То же можно сказать и по отношению к буквам: для того чтобы опознать в букве-картинке букву-графему, необходимо не только отвлечься от особенностей шрифта, но и быть способным к аналитико-синтетической деятельности определенного уровня.

Узнаваемые изображения объектов отражают главные функциональные или категориальные признаки этих объектов. 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.

Обобщение клинических наблюдений.

– *Лицевая агнозия* в чистом виде проявляется как невозможность узнавания лиц знакомых или известных людей при непосредственном контакте, на фотографиях и т. п. Также нарушается опознание лиц как мужских, или женских, понимание мимики и определение возраста. В то же время пациенты редко ошибаются в узнавании знакомых людей при встрече, т. к. узнают знакомый голос (т. е. опираются на слуховой гнозис), ориентируются по прическе, одежде и т. п. При задании опознать лица на фотографиях как мужские, женские, мальчика или девочки пациенты пытаются опереться на схематичный ориентир: борода, усы – мужчина, длинные волосы – женщина, бант – девочка и т. п. Для опознания выражения лица помогает схематичное изображение мимики. Естественно, схематичные опоры помогают далеко не всегда, а иногда вводят в заблуждение: портреты известных людей прошлых столетий в париках (Ломоносов, Моцарт) обычно опознаются пациентами как женские. Адекватное восприятие незнакомых людей, т. е. общая оценка внешности как приятной, заслуживающей доверия или нет, определение возраста и т. п., для пациентов с лицевой агнозией полностью недоступно. В то же время пациенты, страдающие лицевой агнозией, никогда не сомневаются, что перед ними именно лицо, могут показать части лица – глаза, нос и т. п., могут нарисовать схему лица (овал, два глаза, нос, рот, уши). Приведенные факты показывают, что при лицевой агнозии нарушено опознание индивидуальных признаков лиц, но сохранена схема «лицо».

Есть достаточно оснований утверждать, что при лицевой агнозии страдает опознание индивидуальных признаков не только лиц, но опознание индивидуальных признаков любых зрительных стимулов, т. е. этот синдром правильнее называть нарушением индивидуализированного опознания [19–22]. Неузнавание лиц в данном синдроме ярко выступает на первый план только потому, что узнать «в лицо» – всегда опознание индивидуальных качеств, а узнавание предметов в повседневной жизни – это, чаще всего, отнесение их к какой-то категории.

Многие авторы [1, 6, 20, 23] отмечают, что при данном синдроме пациенты схематичные изображения опознают лучше, чем реалистичные. Пациенты с нарушением индивидуализированного

опознания не испытывают затруднений при назывании букв, но скорость чтения у них оказывается сниженной [1, 19, 22]. Пациенты перестают узнавать слова целиком как целостные конфигурации и вынуждены прибегать к аналитическому способу чтения, т. е. читать по буквам. Скорость чтения вслух и про себя у таких больных становится одинаковой. На письме можно встретить ошибки, свидетельствующие о снижении роли зрительной памяти: так, один из наших пациентов свою фамилию *Григорьев* написал как *Кригорьев*. Письмо пациентов становится фонетическим; характерны замены букв, обозначающих звуки, плохо различимые в слове на слух.

При правополушарном поражении возможно не только нарушение индивидуализированного опознания, но также фрагментарность восприятия и односторонняя пространственная агнозия. Данные агнозии при массивных очагах могут наблюдаться одновременно, но также встречаются изолированно. Как и нарушение индивидуализированного опознания, фрагментарность восприятия и односторонняя пространственная агнозия проявляются при опознании всех зрительных стимулов, но в разной степени в зависимости от качеств стимула; сохранные левополушарные схемы предметов также играют важную роль в частичной компенсации данных нарушений (подробнее см. [19, 22]).

– *Агнозия на буквы* приводит к нарушению чтения – агностической или «чистой» алексии. Пациент не испытывает затруднений при узнавании лиц, предметов, реалистичных изображений, сохранной является и способность писать. Но при этом пациент не узнает буквы и не может прочитать даже то, что написано им самим. Затрудненной или нарушенной является способность копировать буквы или переписывать текст. Частичная незначительная компенсация связана с сохранным правополушарным индивидуализированным опознанием и присущей этой функции памятью: иногда пациенты могут узнавать отдельные буквы и слова как картинки. Обычно это можно наблюдать у пациентов, которые в детстве рано выучили названия букв. В этих случаях называние букв доступно, но аналитическое побуквенное чтение невозможно, потому что буквы-картинки утратили функцию графемы.

Агнозия на буквы может сочетаться с агнозией на цифры, но также может выступать как изолированный синдром. В таком случае пациент опознает знаки – 0 и 3 – либо только как цифры, либо только как буквы.

Известно о связи нарушения называния предметов при некоторых формах афазии (левополушарное поражение мозга) и затруднениями, которые испытывают пациенты при попытках изобразить простейшие предметы [19, 24, 25]. Так, один из наших пациентов, который мог скопировать сложное изображение, был не в состоянии нарисовать по памяти многие предметы: не знал, где расположить ручку у чашки, солнце нарисовал лучами вовнутрь и т. п. Как правило, проблемы рисования схем предметов сочетаются с нарушением узнавания схематичных изображений и выраженными затруднениями подбора слов, обозначающих конкретные предметы. Глезерман (18:48): «…топологическая схема предмета есть не что иное, как сочетание функциональных признаков. Это сочетание, в свою очередь, представляет собой эмпирический компонент значения слова в современном языке». Пациенты с затруднениями изображения предметов не испытывают затруднений при опознании лиц и реальных предметов, а реалистичные изображения опознают лучше, чем схематичные. При нарушении схемы «лицо» (обычно в синдроме амнестической афазии) пациент испытывает затруднения при рисовании обобщенного лица: не знает, где нарисовать уши, волосы и т. п. Опознание реальных лиц и портретов не затруднено.

Нарушения топологических схем букв и цифр, приводящие к синдромам агностической «чистой» алексии и цифровой агнозии, ярко проявляются в клинике. В то же время нарушения топологических схем предметов и лица в синдроме амнестической афазии в клинике незаметны: узнавание реальных лиц и предметов у таких пациентов сохранно, а на первый план выступают затруднения вербального общения.

Е.П. Кок (1:96) отмечает, что клинический анализ ряда опубликованных наблюдений агнозии на лица и агнозии на буквы с синдромом «чистой алексии» приводит к мысли, что эти расстройства возникают при одной и той же локализации очага, но только агнозия на лица – при поражении правого, а агнозия на буквы – при поражении левого полушария. Узнавание лиц и способность читать имеют разные корни в нервной системе: узнавание лиц – врожденная видоспецифическая функция, присущая всем здоровым людям, а чтение – продукт культуры, навык, который может быть сформирован лишь при определенных условиях в результате обучения. Современные нейрофизиологические исследования [26–28] свидетельствуют, что обучение чтению влияет на церебральный субстрат для восприятия лиц: узнавание лиц становится правополушарной функцией по мере того, как ребенок учится читать (гипотеза рециркуляции нейронов (*the hypothesis of neuronal recycling*). Данная гипотеза подтверждает мнение неврологов рубежа 19–20 веков, которые нередко имели дело с неграмотными пациентами: у неграмотных людей не развивается доминантности левого полушария, и поэтому у них не бывает тяжелых афазий или афазия вообще не развивается (29:20).

Правополушарная локализация поражений, приводящих к агнозии на лица, и левополушарная – к агнозии на буквы, в докомпьютерную эпоху являлась важным маркером при топической диагностике. Многочисленные современные исследования подтверждают эти данные. Тем не менее нельзя полностью исключить возможность зеркальной организации, особенно у левшей [30]. Целью пластичности является, прежде всего, обеспечение видоспецифических функций мозга

[31] и, вероятно, это может быть достигнуто разными путями. Вопрос о связи различных зрительных агнозий со стороной и зоной поражения, а также о роли повреждения мозолистого тела в формировании синдромов окончательно не решен (6:162). Но для нормального функционирования зрительного опознания необходим не конкретный мозговой субстрат (вероятно, здесь может быть некоторая вариативность), а сосуществование и взаимодействие двух когнитивных механизмов. Поэтому не будем строго связывать описанные когнитивные механизмы с функцией правого и левого мозга.

Выводы

1. Зрительный гнозис, в норме отвечающий за опознание отдельных объектов, обеспечивается взаимодействием двух когнитивных механизмов: *индивидуализированное опознание зрительных стимулов и аналитико-синтетическая деятельность, вычленяющая в индивидуализированном опознании функциональные (топологические) схемы предметов.*

2. *Индивидуализированное зрительное опознание* охватывает все зрительное пространство. Здесь нет опознания по отдельным признакам или категориям. Индивидуализированное зрительное опознание не тождественно целостному восприятию.

3. *Аналитико-синтетическая деятельность, вычленяющая в индивидуализированном зрительном опознании функциональные (топологические) схемы предметов.* В первые годы жизни аналитико-синтетическая обработка нерасчлененного индивидуализированного опознания приводит к формированию и накоплению функциональных схем тех конкретных предметов, с которыми ребенок соприкасается, т. е. наполнение хранилища схем происходит поэтапно и зависит от индивидуального опыта индивида. Аналитико-синтетическая обработка зрительных стимулов строится в онтогенезе и функционирует по принципу многоканального аппарата (как минимум, частично).

4. *Как можно представить взаимодействие двух когнитивных механизмов?* Два когнитивных механизма находятся в постоянном взаимодействии и включаются в зависимости от качества зрительного стимула и задачи опознания. Так, один и тот же стимул – рукописный текст – при задании прочитать активизирует буквенный гнозис, т. е. схемы букв, но если нужно узнать знакомый почерк, то активизируется индивидуализированное опознание. Лицо человека может быть узнано лишь с помощью индивидуализированного опознания, но при задании найти лица среди других зрительных стимулов будет активизирована схема «лицо». При опознании предметов – чем шире категория опознания (к примеру, найти яблоки среди других фруктов), тем более будут задействованы схемы предметов и, напротив, чем уже категория (например, среди яблок найти яблоки определенного сорта), тем вероятнее опора на индивидуализированное опознание.

5. *При зрительных агнозиях* в результате одностороннего поражения мозга нарушается вклад одного из механизмов зрительного опознания, поэтому пациент вынужден опираться на сохранный механизм, что и обусловливает известную симптоматику зрительных агнозий.

Литература

1. *Кок Е.П.* Зрительные агнозии. Л., 1967.

2. *Dalrymple K.A., Garrido L., Duchaine B.* Dissociation between face perception and face memory in adults, but not children, with developmental prosopagnosia // Developmental Cognitive Neuroscience. 2014. Vol. 10. P. 10–20.

3. *Corrow S.L., Dalrymple K.A., Barton J.J.* Prosopagnosia: current perspectives. Eye Brain. 2016. Sep 26;8:165-175. doi: 10.2147/EB.S92838.

4. *Gerlach, C., Klargaard, S.K., Petersen, A., & Starrfelt, R.* Delayed processing of global shape information in developmental prosopagnosia. *PLoS ONE*. 2017. 12(12). Article ID e0189253.

5. *Gerlach, C., & Starrfelt, R.* Delayed processing of global shape information is associated with weaker top-down effects in developmental prosopagnosia. *// Cognitive Neuropsychology*, 2018. *35*(8), 471–478. http://dx.doi.org/10.1080/02643294.2018.1519505

6. *Хомская Е.Д.* Нейропсихология. М., 1987.

7. *Глезер В.Д.* Зрение и мышление. М. : Наука, 1985, с. 209–210.

8. *Susilo T., Yovel G., Barton J.J., Duchaine B.* Face perception is category-specific: evidence from normal body perception in acquired prosopagnosia // *Cognition*. 2013, Oct; 129(1):88–94. doi:10.1016/j.cognition.2013.06.004. Epub 2013.

9. *M. Jane Riddoch, Robert A. Johnston, R. Martyn Bracewell, Luc Boutsen & Glyn W. Humphreys.* Are faces special? A case of pure prosopagnosia // *Cognitive Neuropsychology*. 2008. Vol. 25, Is. 1. P. 3–26. Received 27 Apr 2007.

10. *Busigny T., Joubert S., Felician O., Ceccaldi M., Rossion B.* Holistic perception of the individual face is specific and necessary: evidence from an extensive case study of acquired prosopagnosia // *Neuropsychologia.* 2010. Dec; 48(14):4057-92. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2010.09.017.

11. *Busigny T., Graf M., Mayer E., Rossion B.* Acquired prosopagnosia as a face-specific disorder: ruling out the general visual similarity account // *Neuropsychologia*. 2010. Jun;48(7):2051-67. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2010.03.026.

12. *Busigny T., Rossion B.* Holistic processing impairment can be restricted to faces in acquired prosopagnosia: evidence from the global/local Navon effect//*J Neuropsychol*. 2011 Mar;5(Pt 1):1-14. doi: 10.1348/174866410X500116.

13. Behrmann M, Plaut DC. Bilateral hemispheric processing of words and faces: evidence from word impairments in prosopagnosia and face impairments in pure alexia // Cereb Cortex. 2014 Apr;24(4):1102-18. doi: 10.1093/cercor/bhs390.

14. *Robotham R.J., Starrfelt R.* Face and Word Recognition Can Be Selectively Affected by Brain Injury or Developmental Disorders // *Front Psychol*. 2017. Sep 6;8:1547. doi: 10.3389/fpsyg.2017.01547. eCollection 2017.

15. *Strappini F., Pelli D.G., Di Pace E., Martelli M.* Agnosic vision is like peripheral vision, which is limited by crowding // *Cortex*. 2017 Apr;89:135-155. doi: 10.1016/j.cortex.2017.01.012. Epub 2017

16. *Marcello Negrini, Diandra Brkić, Sara Pizzamiglio, Isabella Premoli and Davide Rivolta*. Correlates of Featural and Spacing Processing for Face and Non-face Stimuli Front. Psychol. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00333.

17. *Александрова Н.Ш.* Формирование способности схематического изображения объектов в онтогенезе (Детские рисунки). Проблемы патологии развития и распада речевой функции. СПб. : Изд-во СПб ун-та, 1999. С. 25–31.

18. *Глезерман Т.Б.* Психофизиологические основы нарушения мышления при афазии. М., 1986.

19. *Александрова Н.Ш.* Алексия в структуре зрительно-гностических расстройств у больных с очаговыми поражениями головного мозга // Патология речи: история изучения, диагностика, преодоление. СПб, 1992. С. 97–106.

20. *Вассерман Л.И., Дорофеева С.А., Меерсон Я.А.* Методы нейропсихологической диагностики. СПб, 1997.

21. *Гончаров О.А.* Механизмы зрительных агнозии. http://mir.spbu.ru/index.php?option=com_k2&view=item&id=721:non-violence-14.

22. *Александров А.Е., Александрова Н.Ш.* К проблеме организации зрительного гнозиса // Вторая междунар. конференция, посвященная 100-летию со дня рождения А.Р. Лурия. М. : МГУ, 2002, с. 2.

23. *Корсакова Н.К., Московичюте Л.И.* Клиническая нейропсихология. М., 1988.

24. *Хомская Е. Д.* Нейропсихология: 4-е издание. СПб, 2005, с. 236.

25. *Лурия А.Р.* Мозг человека и психические процессы. М., 1962.

26. *Dehaene S., Pegado F., Braga L.W., Ventura P., Nunes Filho G., Jobert A., Dehaene-Lambertz G., Kolinsky R., Morais J., Cohen L.* How learning to read changes the cortical networks for vision and language // *Science*. 2010 Dec 3;330(6009):1359-64. doi: 10.1126/science.1194140. Epub 2010 Nov 11.

27. *Dundas, E.M., Plaut, D.C., and Behrmann, M.* An ERP investigation of the co-development of hemispheric lateralization of face and word recognition. *// Neuropsychologia* 2014. 61, 315–323. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.05.006

28. *Dehaene, S., and Cohen, L.* Cultural recycling of cortical maps // *Neuron*. 2007. 56. P. 384–398. doi: 10.1016/j.neuron.2007.10.004

29. *Джексон Дж.Х.* Избранные работы по афазии. СПб, 1996, с. 20.

30. *Доброхотова Т.А., Брагина Н.Н.* Левши. М., 1994.

31. *Александрова Н.Ш.* Обеспечение видоспецифических форм поведения – первоочередная цель пластичности мозга? // Материалы Всероссийской конф. по когнитивной науке. Архангельск, 19–22 ноября 2018 г. https://narfu.ru/upload/medialibrary/ec1/Sbornik-KISE_2018-_isbn_-.pdf

Моделирование режимов спонтанного освоения нескольких языков как инструментов общения

Н.Ш. Александрова[1], В.А. Антонец[2,3], И.В. Нуйдель[2,3], О.В. Шемагина[2,3], В.Г. Яхно[2,3]

[1]Sprachbrücke e.V., Берлин, Германия
[2]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[3]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
yakhno@appl.sci-nnov.ru

1. Введение

Освоение детьми нескольких языков в языковой среде характеризуется следующими особенностями [1–13]:

- Общий словарь ребенка до трех лет при двуязычном воспитании не превышает словаря монолингва. Если один язык доминирует и приближается к уровню монолингва, то значительно отстает другой язык. Если вход каждого из языков примерно равен по времени, то дети в обоих языках находятся «посередине», заметно отставая от уровня монолингвов [1].

- Доминирование одного языка при переходе к фразовой речи благоприятнее, чем сбалансированный вход [2].

- Билингвы в детстве и в более старшем возрасте обладают меньшим пассивным словарем и хуже оперируют вербальными стимулами, чем монолингвы [3–6].

- Естественный билингвизм возникает лишь при длительно сохраняющейся потребности общаться на обоих языках. Двуязычная среда является необходимым условием становления билингвизма, но не его причиной [7, 8].

- При естественном билингвизме языки могут не только развиваться, но и останавливаться в развитии, обедняться и подвергаться аттриции – полному стиранию. В одноязычной среде языковой регресс возможен лишь при тяжелой болезни [9–13].

- Раннее многоязычие не всегда сочетается с высоким интеллектом и успешностью обучения в школе [7].

2. Описание феноменологической модели

Для концептуального описания и анализа развития субъекта в условиях предоставленной ему среды и сопутствующего этому развитию спонтанного (бессознательного) овладения двумя языками как инструментами общения используем известный физический подход составления балансных уравнений (см., например, [14–17]).

Из экспериментальных данных и соображений здравого смысла при моделировании двуязычия ограничимся рассмотрением пяти основных (взаимосвязанных) переменных и трех важных параметров:

M(t) – количество активных алгоритмов операций над образами окружающей среды. Такой набор алгоритмов обычно называется мировоззрением субъекта. Для каждого индивидуума $M \in (0; M_{\max})$, *M(t)* предопределяется генотипом и средой;

П(t) – поток внешних или внутренних сигналов, которые осознаются или ожидаются субъектом с мировоззрением *M*(*t*);

$V_1(t)$, $V_2(t)$ – количество инструментальных алгоритмов (когнитивных фильтров), нашедших отображение в 1-м и 2-м языках соответственно;

R(t) – пороговая переменная, определяющая переключение динамической системы освоения языков при активизации использования одного из них;

Э(t) – параметр эмоционального состояния субъекта, лежащий в интервале $0 < Э(t) < 1$, т. е. от наиболее «вдохновлённо-благоприятного» (вблизи от 0) до наиболее «разрушительно-огорчительного» (вблизи 1);

E(t) – параметр энергетического состояния субъекта, лежащий в интервале $0 < E(t) < 1$, т. е. от наиболее «истощенного» (вблизи от 0) до наиболее «эйфорично-уверенного» в своей силе (вблизи от 1);

Q(t) – параметр стресса субъекта, лежащий в интервале $0 < Q(t) < 1$, изменяющийся от этапа активации к этапу закрепления решений, переходах к расслаблению, отдыху и «нормальному» состоянию.

Рассмотрим версии балансных уравнений, с помощью которых можно изучать динамические процессы при развитии субъекта.

2.1. Первое из предлагаемых балансных уравнений описывает изменение во времени количества активных алгоритмов операций над образами окружающей среды:

$$\tau_{1M}\frac{dM}{dt} = -\frac{\tau_{1M}}{\tau_{2M}}\cdot M + \left(1 + K_{p_1}(t)\cdot V_1 + K_{p_2}(t)\cdot V_2\right)\cdot F_M\left[-T_M + \Pi\right], \quad (1)$$

где τ_{1M} – характерное время спонтанного обучения новым алгоритмам для работы с образами внешней среды (обычно минуты – часы); τ_{2M} – характерное время забывания ранее воспринятых алгоритмов для работы с образами внешней среды (обычно, месяцы – годы); K_{p1}, K_{p2} – весовые коэффициенты поступления информационных потоков по языковым каналам V_1 , V_2 соответственно; F_M – пороговая функция с параметром T_M.

2.2. Второе балансное уравнение описывает изменение потока сигналов *П(t)* (внешних или внутренних), которые осознаются или ожидаются субъектом, имеющим мировоззрение, характеризующееся объемом *M(t)*. *П(t)* пропорционально числу алгоритмов, которые система научилась

генерировать для выделения из сенсорного потока важных для нее элементов:

$$\tau_{1\Pi}\frac{d\Pi}{dt}=-\frac{\tau_{1\Pi}}{\tau_{2\Pi}}\cdot\Pi+ \\ +F_{\Pi}\left[-T_{\Pi}+\sigma_{\Pi M}\cdot \mathrm{M}+\sigma_{\Pi_1}\cdot V_1+\sigma_{\Pi_2}\cdot V_2\right], \quad (2)$$

где $\tau_{1\Pi}$ – характерное время изменения потока осознаваемых внешних сигналов (обычно секунды – минуты); $\tau_{2\Pi}$ – характерное время забывания или разрушения ранее воспринятых внешних сигналов (обычно часы – дни – месяцы); F_{Π} – пороговая функция с параметром T_{Π}; $\sigma_{\Pi M}$, $\sigma_{\Pi 1}$, $\sigma_{\Pi 2}$ – весовые коэффициенты, определяющие влияние $M(t)$, V_1, V_2 соответственно на активацию осознания воспринимаемых сигналов.

2.3. Третье балансное уравнение описывает изменение числа активных инструментальных алгоритмов и «когнитивных фильтров» для освоения одного из языков общения:

$$\tau_{1V_i}\frac{dV_i}{dt}=-\frac{\tau_{1V_i}}{\tau_{2V_i}}\cdot V_i+ \\ +F_i\left[-T_i(\mathrm{M},\Э,Q,E)+\Pi+\gamma_{ii}\cdot V_i-\sum_{j\neq i}\gamma_{ij}\cdot V_j\right] \quad (3)$$

где τ_{1Vi} – характеное время освоения; τ_{2Vi} – характеное время забывания; F_i – пороговая функция с параметром $T_i(\mathrm{M},\Э,Q,\mathrm{E})$; γ_{ij} – весовые коэффициенты, определяющие влияние j-го языка на активацию изучения i-го языка; $T_i(\mathrm{M},\Э,Q,\mathrm{E})$ – порог запуска алгоритмов обучения i-й области деятельности, в частности языку общения. Для описания освоения языков в двуязычной среде i принимает значения 1 или 2.

Из соображений здравого смысла можно использовать, например, зависимость:

$$T_i(\mathrm{M},\Э,Q,\mathrm{E})=T_{i0}-a_{iM}\cdot \mathrm{M}+ \\ +a_{i\Э}\cdot\Э+a_{iQ}\cdot Q+a_{iE}\cdot(1-E).$$

Для простоты описания и анализа режимов обучения рассмотрим случай обучения только двум языкам (билингвизм). Соответственно, получим систему из двух уравнений:

$$\tau_{1V_1}\frac{dV_1}{dt}=-\frac{\tau_{1V_1}}{\tau_{2V_1}}\cdot V_1+F_0\left[-T_1+\gamma_{11}\cdot V_1-\gamma_{12}\cdot V_2\right], \quad (4)$$

где τ_{1V_1} – характерное время спонтанного обучения новым элементам первого языка (обычно дни – недели); τ_{2V_1} – характерное время разрушения доли элементов первого языка или перевод их из активной рабочей памяти в пассивное «хранилище» (обычно месяцы – годы).

2.4. Четвертое балансное уравнение описывает изменение числа активных инструментальных алгоритмов и «когнитивных фильтров» для освоения второго языка:

$$\tau_{2V_2}\frac{dV_2}{dt}=-\frac{\tau_{1V_2}}{\tau_{2V_2}}\cdot V_2+ \\ +F_0\left[-T_2-\gamma_{21}\cdot V_1+\gamma_{22}\cdot V_2\right], \quad (5)$$

где τ_{1V_2} – характерное время спонтанного обучения новым элементам второго языка (обычно дни – недели); τ_{2V_2} – характерное время разрушения доли элементов второго языка или перевод их из активной рабочей памяти в пассивное «хранилище» (обычно месяцы – годы).

Нелинейные функции в приведенных выше уравнениях (1)–(2) и (4)–(5) имеют ступенчатую зависимость. Для упрощения начального рассмотрения используем для каждой из них единичную функцию Хевисайда.

2.5. Пятое уравнение определяет последовательность операций $R_i(t)$, которая выполняется распознающей системой для определения наиболее важных черт внешней ситуации и условий, в которых необходимо использовать тот или иной язык (адекватный ситуации) для общения и включения алгоритмов обучения, соответствующих именно этому языку. За время τ_p (доли секунды) происходит распознавание и переключение:

а) для первого языка использование только уравнения (4), при постоянной величине V_2 и $K_{p_1}(t)=K_{0p_1}$, $K_{p_2}(t)=0$ б) для второго языка использование только уравнения (5) при постоянной величине V_1, и $K_{p_1}(t)=0$, $K_{p_2}(t)=K_{0p_2}$	(6)

2.6. Из известных экспериментальных данных времена реагирования основных переменных системы и важных управляющих параметров располагаются в следующем порядке:

τ_p <<	τ_{Π} < или <<	τ_M < или <<	$\tau_{\Э}$ <	τ_E <
доли секунды	сек. - мин.	мин. - часы	мин.-часы - дни	мин.-часы-недели

τ_Q < или <<	τ_{1Vi} ≈	τ_{2Vi}
мин.-часы-недели	дни - недели	дни - недели

(7)

Таким образом, при рассмотрении динамических процессов можно выделить иерархию этапов «быстрых» и «медленных» изменений переменных. Важные параметры, связанные с эмоциональными, энергетическими и стрессовыми процессами в рамках данного рассмотрения будем считать постоянными.

3. Рассмотрение ряда режимов функционирования феноменологической модели

Анализ нелинейных уравнений (1)–(2) и (4)–(5) и описываемых ими динамических процессов проводился с помощью стандартных радиофизических методов анализа релаксационных систем [14–16].

3.1. Для описания процессов изменения М и П, возможные решения уравнений (1) и (2) рассматривались на фазовые плоскости, с учетом величин «обученности» для первого и второго языков. При этом все остальные переменные считаем постоянными. Анализ фазовых портретов показал, что для малых или отрицательных порогов T_{Π} и T_{M} система генерирует новые алгоритмы для вы-

деления новых сигналов-образов из внешнего сенсорного потока. Соответственно увеличивается и М – число алгоритмов для выполнения операций с образами внешней среды, $\mathrm{M} \to \mathrm{M}_1$ или M_2, а $\Pi \to \frac{\tau_{2\Pi}}{\tau_{1\Pi}}$.

Увеличение порогов T_Π и T_M приводит к появлению зоны разрушения ранее созданных алгоритмов анализа сигналов из внешней среды, в которой $\mathrm{M} \to 0$ и $\Pi \to 0$, либо блокировку только мировоззренческих алгоритмов ($\mathrm{M} \to 0$) при росте осознания сенсорных сигналов $\Pi \to \frac{\tau_{2\Pi}}{\tau_{1\Pi}}$. Таким образом, из уравнений (1) и (2) следует, что большие пороги включения механизмов обучения и осознанного восприятия потока внешних сенсорных сигналов могут блокировать спонтанное обучение. Известно, что эти пороги возрастают при неблагоприятных эмоциональных состояниях, а также недостаточном энергетическом обеспечении субъекта.

3.2. Фазовые плоскости для описания процессов изменения обучения двум языкам рассмотрим в предположении, что М и П достигли своих стационарных состояний:

$\mathrm{M} = \frac{\tau_{2\mathrm{M}}}{\tau_{1\mathrm{M}}} \cdot \left(1 + K_{0p_1} \cdot V_1\right)$ для первого языка;

$\mathrm{M} = \frac{\tau_{2\mathrm{M}}}{\tau_{1\mathrm{M}}} \cdot \left(1 + K_{0p_2} \cdot V_2\right)$ для второго языка;

$\Pi = \frac{\tau_{2\Pi}}{\tau_{1\Pi}}$. Эти значения подставим в уравнения (4) и (5). В этом случае пороги T_1 и T_2 могут стать отрицательными, что обеспечивает условия спонтанного обучения языкам общения. Анализ возможных динамических режимов изменения переменных V_1 и V_2 в последовательностях этапов обучения то первому, то второму языку наглядно показан на фазовых плоскостях на рис. 1. Неустойчивые ветки нуль-изоклин обозначены как «порог 1» для $dV_1/dt = 0$ и «порог 2» для $dV_2/dt = 0$.

Важно отметить, что в случае обучения только одному языку (например, V_1, траектория *ak* на рис. 1, *а*) величина переменной будет превышать величину каждой из переменных V_1 и V_2, полученных на этапах их последовательного обучения. Если число и длительности этапов обучения для V_1 и V_2 суммарно равны этапам обучения только для V_1, то V_2 для монолингва будет в два раза превышать величины V_1 и V_2 для билингва.

На рис. 1, *б* приведены примеры динамических процессов (траекторий) при попытках обучения двум языкам с несколько измененными γ_{ij} – весовыми коэффициентами, определяющими влияние одного языка на активацию изучения другого языка (*i* принимает значения 1 или 2).

Видно, что в демонстрируемых случаях траектории изменения переменных зависят от выбора начальных состояний переменных. При этом на рисунке можно выделить четыре области (1, 2, 3, 4) с разными особенностями развития процессов. Аналогичный анализ возможных траекторий движения изображающей точки был получен и для случая T_1 и T_2 больше нуля (см. рис. 2).

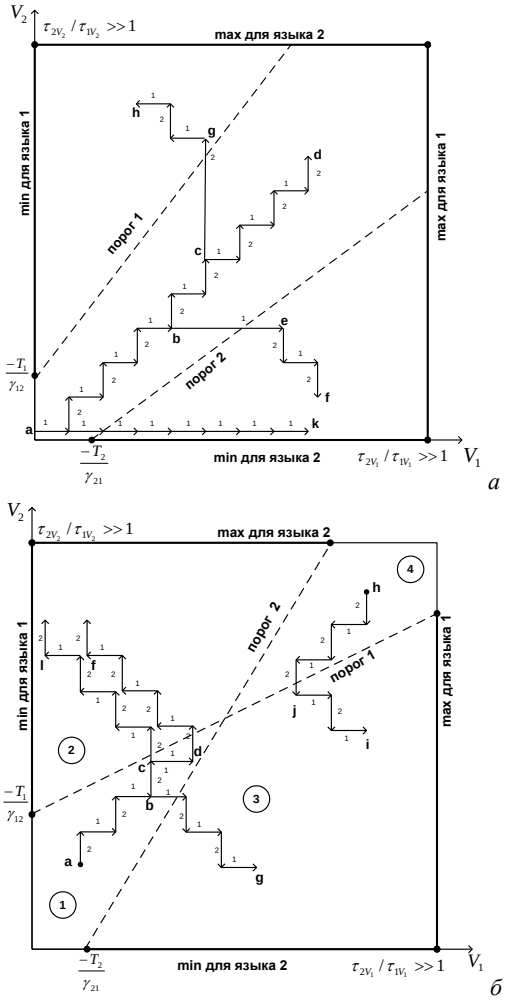


Рис. 1. Примеры движений изображающей точки V_1, V_2 в случае T_1 и T_2 меньше нуля. Этапы обучения первому языку (горизонтальные линии) означены цифрой 1, а второму языку (вертикальные линии) цифрой 2: а) Траектория abcd соответствует процессу обучения и первому и второму языку. Траектория ak показывает процесс обучения только первому языку. Траектория cgh демонстрирует переход от обучения двум языкам к освоению только второго и торможения первого. Траектория bef демонстрирует переход от обучения двум языкам к освоению только первого и торможения второго. б) Выделены четыре области процессов: (1–4). Параметры системы подобраны таким образом, что в области 1 возможно обучение двум языкам – траектория abcd до точки d; в области 2 возможно обучение второму языку, а первый язык тормозится – траектории ce и df; в области 3 возможно обучение первому языку, а второй язык тормозится – траектории bg и ji; в области 4 оба языка тормозятся – траектория hj до точки j.

Для проверки адекватности полученных модельных результатов требуется обсуждение с практическими психологами возможностей использования имеющихся методик или разработка новых подходов для измерения в реальных условиях основных параметров рассмотренной модели (напр.: $\tau_{1\mathrm{M}}, \tau_{2\mathrm{M}}, \tau_{1\Pi}, \tau_{2\Pi}, T_\mathrm{M}, T_\Pi, \tau_{1V_i}, \tau_{2V_i}, T_{V_i}, \gamma_{ij}$ и

других определяющих параметров). При получении таких данных возможна не только верификация используемого модельного рассмотрения, но и на его основе формирование методик коррекции регистрируемых нарушений в наблюдаемых случаях спонтанного, естественного обучения детей.

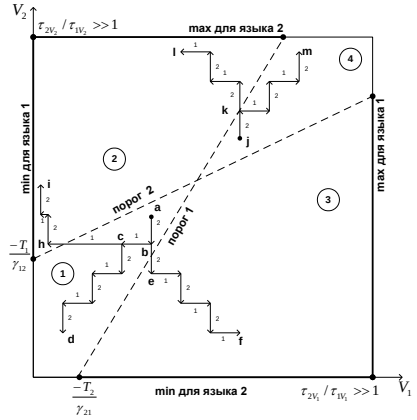


Рис. 2. Примеры движений изображающей точки (V_1 и V_2) для системы уравнений (4) и (5) в случае T_1 и T_2 больше нуля. Этапы обучения первому языку (горизонтальные линии) означены цифрой 1, а обучения второму языку (вертикальные линии) цифрой 2. Параметры системы подобраны таким образом, что в зоне 1 оба языка тормозятся – траектория acd; в зоне 2 возможно обучение второму языку, а первый язык тормозится – траектории chi и kl; в зоне 3 возможно обучение первому языку, а второй язык тормозится – траектория bef; в зоне 4 оба языка могут развиваться от точки j – траектория jkm.

4. Выводы

Приведенная феноменологическая модель спонтанного освоения языков как инструментов общения позволила выделить области параметров, соответствующих экспериментально зафиксированным режимам при освоении языков у детей [1–13].

1. Показано, что при больших порогах включения механизмов освоения (обучения) и осознанного восприятия потока внешних сенсорных сигналов возможно блокирование спонтанного освоения. Эти пороги возрастают при неблагоприятных эмоциональных состояниях или при недостаточном энергетическом обеспечении субъекта.

2. Показано, что спонтанное, естественное освоение нескольких (двух) языков приводит к снижению объема каждого языка по сравнению со случаем освоения только одного языка. Причина этого заключается в трате временного ресурса на несколько языков вместо использования его на освоение одного языка.

3. Рассмотрены условия, при которых происходят переключения от освоения двух языков к освоению только одного языка и торможению другого, или торможению освоения обоих языков.

Более подробное исследование возможных режимов функционирования и переключений между ними, несомненно, может быть проведено, если появятся специалисты (например, практические психологи), которым будет интересно интерпретировать регистрируемые ими экспериментальные факты.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект №14.Y26.31.0022.

Литература

1. *Hoff E., Core C.* Input and Language Development in Bilingually Developing Children // Semin Speech Lang. 2013; 34: 215–226. doi: http://dx.doi.org/10.1055/s-0033-1353448.

2. *Александрова Н.Ш.* Может ли естественный билингвизм быть вреден? // Вестник РУДН. Серия: Вопросы образования: языки и специальность. 2017. Т. 14, № 2. С. 211–216.

3. *Bialystok E., Craik F.I.M., Luk G.* Cognitive control and lexical access in younger and older bilinguals // J. of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition. 2008; 34: 859—873. URL: https://doi.org/10.1037/a0015638.

4. *Białystok E.* Bilingualism: The good, the bad, and the indifferent. // Bilingualism: Language and Cognition 12 (1), 2009, P. 3–11 doi: 10.1017/S13667289080034773.

5. *Bialystok E., Luk G., Peets K.F., Yang S.* Receptive vocabulary differences in monolingual and bilingual children // Biling (Camb Engl). 2010 Oct; 13(4): P. 525–531. doi: 10.1017/S1366728909990423.

6. *Portocarrero J.S., Burright R.G., Donovick P.J.* Vocabulary and verbal fluency of bilingual and monolingual college students//Archives of Clinical Neuropsychology. 2007; 22: P. 415–422. https://doi.org/10.1016/j.acn.2007.01.015.

7. *Александрова Н.Ш.* Двуязычная среда – причина естественного билингвизма или лишь необходимое условие? // От билингвизма к транслингвизму: про и контра. Матер. III Междунар. научно-практической конференции. М. : РУДН, 1–2 декабря 2017, 142–148.

8. *Александрова Н.Ш.* Почему Лера не заговорила по-немецки? К вопросу организации двуязычных детских садов // Curriculare und soziale Aspekte der Bildung und Erziehung bilingualer Kinder. Band 6; Berlin, 2015; 273–275.

9. *Александрова Н.Ш.* Родной язык, иностранный язык и языковые феномены, у которых нет названия // Вопросы языкознания. 2006. №3. С. 88–100.

10. *Александрова Н.Ш.* Билингвизм – адаптация в языковой сфере? // VI Международная конференция по когнитивной науке : тезисы докладов. Калининград, 2014, с. 114–115.

11. *Köpke B.* Language attrition at the crossroads of brain, mind, and society https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00981119/document Submitted on 20 Apr 2014

12. Schmid, M. & Lowie W. editors. Modeling Bilingualism: From Structure to Chaos. In Honor of Kees de Bot. 308 p. John Benjamins. 2011.

13. *Александрова Н.Ш.* О чем говорят единичные наблюдения естественного билингвизма? Может ли помочь математика? Казань, 2017.

14. *Рабинович М.И., Трубецков Д.И.* Введение в теорию колебаний и волн // М. : Наука, 1984. 423 с.

15. *Нуйдель И.В., Яхно В.Г.* Моделирование процессов преобразования сенсорной информации // Нейрокомпьютеры как основа мыслящей ЭВМ, 1993, с. 207–224.

16. *Яхно В.Г.* Модели нейроноподобных систем. Динамические режимы преобразования информации // Материалы школы «Нелинейные волны–2002». Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2003. С. 90–114.

17. *Яхно В.Г., Макаренко Н.Г.* Поможет ли нам создание «цифрового двойника человека» лучше понимать друг друга? // Подходы к моделированию мышления, глава 6, с. 169–202 ; под ред. В.Г. Редько. М. : ЛЕНАНД. 2014, 392 с. (Синергетика от прошлого к будущему. № 70. Науки об искусственном. № 13)

Перенос ценной информации и причинность

А.К. Алексеев

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область

«Перенос информации» очень распространенное выражение в естественных науках [1–4]. Идея о том, что в физических системах переносится не только масса, импульс, энергия, но и информация (или энтропия) не удивительна. Но то, что уравнений динамики недостаточно для описания системы, и эта информация каким-то образом дополняет динамику, на первый взгляд кажется излишним.

Тем не менее влияние переноса информации на динамику системы наблюдается достаточно часто. Некий перенос информации определяет устойчивость конечно-разностных схем, корректность постановок задач (в «правильном» ли месте поставлены граничные или начальные условия, как используется априорная информация, компенсирующая недостаток основной). С ним же связано и распространение возмущений в физических полях. В электромагнитном или акустическом поле это просто передача сигналов. Чаще всего за этими эффектами скрывается существование некоторой области влияния. В релятивистской физике перенос информации и причинность определяются световым конусом влияния. В уравнениях математической физики, описываемых системами частных дифференциальных уравнений (ЧДУ), «информация» (инварианты Римана) переносится по характеристикам в гиперболических задачах. Эллиптические и параболические уравнения переносят информацию мгновенно и нелокально. Системы ЧДУ переносят и смешивают информацию, содержащуюся в начальных и граничных условиях или в источниковых членах.

В стохастических системах перенос плотности вероятности (и соответствующей информации) определяется уравнениями типа Лиувилля или Колмогорова, чьим пропагатором является оператор Перрона – Фробениуса. Его и оператор Купмана (сопряженный) можно определить, используя EDMD и в последующем использовать для переноса плотности вероятности [5, 6]. В принципе нейросети имеют достаточно тесную связь с оператором Перрона – Фробениуса [7]. Поэтому не удивительно, что поток информации через нейросеть (изменение условной энтропии) также используется при анализе ее работы [8].

В квантовой механике перенос плотности вероятности (уравнения Маделунга) влияют на динамику системы непосредственно *(активная информация)* [9].

Таким образом, очень часто уравнения динамики действительно необходимо дополнять анализом некоторого переноса информации. Остается определить, что именно переносится, куда и сколько.

Здесь мы будем считать, что переносится ценная информация в соответствии с [10, 11], которая имеет векторную и тензорную компоненты и включает информацию Шеннона как частный случай.

Векторная часть «ценной информации» соответствует градиенту целевого функционала в пространстве управляющих параметров и обладает многими свойствами интуитивных определений информации, таких как «полезная информация» [12], «ценность информации» [13]. Возникновение и перенос векторной части ценной информации описываются сопряженными уравнениями. Они описывают область влияния, что позволяет эффективно исследовать причинность для систем ЧДУ. Эта идея восходит к работам Г.И. Марчука, который сопряженные параметры обозначал как функцию ценности информации [14].

Тензорная компонента ценной информации соответствует ковариационной матрице погрешности и определяется информационной матрицей Фишера [15]. Ее перенос определяется уравнениями информационной динамики типа Эйнштейна [16] (она задает метрику) или соответствующей аппроксимацией прямого уравнения Фоккера – Планка [17] для гауссианы с помощью пропагатора $(A^{*}WA)^{-1}$. В гауссовом случае матрица Фишера параметризует плотность вероятности, так что ценная информация этого типа имеет кроме геометрического и вероятностный характер.

Для изотропных равновесных систем ценная информация сводится к информации Шеннона – Больцмана, так как в этих условиях векторная часть ее равна нулю (из-за равновесности), а гиперэллипсоид (матрица Фишера) является гиперсферой (вследствие изотропности).

С интуитивной точки зрения, перенос информации должен быть тесно связан с причинностью, что мы и обсудим в данной работе.

Сначала рассмотрим несколько вариантов количественного определения причинности.

Причинность по Грангеру

Для систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) широко используется «причинность по Грангеру» [18, 19], связывающая наблюдаемые временные последовательности и имеющая статистическую природу (использующая корреляции). Эта причинность реализуется через такие понятия, как *information flow*, *information transfer* [1–4], *directed information* [19], соответствующие переносу энтропии Шеннона. Они применимы и к распределенным системам [1, 2]. Однако корреляция далеко не всегда эквивалентна причинности. Вследствие этого и применимость информационных понятий, связанных с причинностью по Грангеру, достаточно ограничена.

Причинность на основе колмогоровской сложности

Колмогоровская сложность [22, 23, 24] – это минимальная длина программы $K = l(p)$, связывающей наблюдения и исходные данные $p : u \to f^{obs}$. Минимальная колмогоровская сложность определяет причинно-следственную связь между двумя случайными переменными и связана с «бритвой Оккама».

Причинность по Марчуку

В работе [20] рассмотрено использование сопряженных уравнений и чувствительности для установления причинных связей характеристик иммунной системы и ее параметров:

"We further use the adjoint equations to make ***causal inferences****"…"Sensitivity analysis provides a means to establish* ***causality relationships*** *between basic parameters of the process kinetics and the clinically measured characteristics of infection".*

Соответственно, сопряженные параметры определяет некоторую причинность, которую обозначим как «*причинность по Марчуку*»**,** связанную с переносом векторной части ценной информации. Эта причинность представляется естественной при оценке величины и области влияния возмущений начальных, граничных условий, источников и других параметров задачи на ценные функционалы с помощью сопряженных уравнений.

Область влияния *по Марчуку* определяется $\Delta u_i = (\nabla \varepsilon, \Delta u_0) = \int \psi_i \Delta u_0 dx$, где ψ_i распространяется назад по времени от $\delta(x - x_i)$.

Отсутствию причинной связи соответствует условие $\nabla \varepsilon = 0$, выраженное через сопряженные параметры (ценную информацию векторного вида). $\nabla \varepsilon = A^* W (Au - f^{obs})$ требует наличия известного прямого и сопряженного операторов. Сопряженные параметры достаточно корректно описывают область влияния.

Причинность *по Марчуку* частично проявляется и при решении обратных задач. В частности некорректность обратных задач часто соотносится с нарушением причинно-следственных связей [21] вследствие специфического выбора начальных и граничных условий. Это верно для обратных задач теплопроводности, обратных эллиптических и гиперболических задач. Для гиперболических задач корректно поставлена эволюции по характеристикам как вперед, так и назад по времени, некорректность возникает при эволюции в поперечном направлении.

Ценная информация векторного типа определяет причинность по Марчуку.

В непараметрическом случае эволюция неопределенности описывается прямым уравнением Колмогорова – Фоккера – Планка. Эволюция векторной части (рецепта) задается обратным уравнением Колмогорова (сопряженным уравнением Фоккера – Планка).

Причинность на основе ценной информации (Фишер – Колмогоров – Марчук)

Согласно подходу, принятому в методе автоматического дифференцирования [25], каждый алгоритм (программа) выполняется на компьютере как последовательность операторов. Мы будем рассматривать программу матричным оператором (или в виде цепочки матриц). В методе автоматического дифференцирования показано, что касательную задачу можно рассматривать как цепочку якобианов, она линейна. В нелинейном случае [11] (EDMD, Kernel trick), такой прием тоже возможен. Поэтому мы здесь считаем программу (алгоритм) матричным оператором $A\colon f^{obs} = A \cdot u$.

Для регуляризации статистических обратных задач используется «оккамовская» регуляризация [15]. Технически она соответствует выбору собственных векторов Гессиана, соответствующих существенным (больше единицы) собственным числам:

$e_i, ..., e_N$ базис R^N, простой, типа $(1,0,...,0)$.

В этом базисе операторы $A \in R^{N \times N}$. Их колмогоровская сложность $N \times N$.

Однако оператор можно перевести в диагональную форму $A = \Omega_R \Lambda \Omega_L$, при этом в базисе ω_R, ω_L он станет диагональным $\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \lambda_N \end{pmatrix}$. Его колмогоровская сложность (минимальная величина) N.

При оккамовской регуляризации e_i [15], соответствующие $\lambda_i < 1$, отбрасываются, остается M существенных векторов. $A_r = \Omega_R \Lambda \Omega_L$,

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \lambda_M \end{pmatrix}.$$

Его колмогоровская сложность $M << N$.

Таким образом:

если задача устойчива (все $\lambda_i \geq 1$),

колмогоровская сложность вектора = N,

колмогоровская сложность оператора = N;

если задача неустойчива (обратная) ($\lambda_i \geq 1, i \leq M$),

колмогоровская сложность вектора = M,

колмогоровская сложность оператора = M.

С этой точки зрения (для обратной задачи):

колмогоровская случайность соответствует полному базису, N векторов. Решения обратной задачи случайны по Колмогорову (алгоритмически);

колмогоровская причинность соответствует минимальному базису, *M* векторов. Решения регуляризованной обратной задачи – причинность по Колмогорову.

Ценная информация тензорного типа определяет колмогоровскую причинность при выборе базиса существенных собственных векторов $F = A^{*}Q^{-1}A$.

Заключение

Сопряженные уравнения позволяют построить для систем, описываемых ЧДУ причинно-следственные соотношения нового типа (причинность *по Марчуку* и *ретропричинность*). В сравнении с *причинностью по Грангеру* это позволяет анализировать причинность не только для ОДУ, но и для ЧДУ, определять области влияния, а также избавиться от проблем, связанных с анализом корреляций.

Ценная информация векторного типа определяет причинность по Марчуку.

Ценная информация тензорного типа определяет причинность по Колмогорову.

В нелинейных задачах сопряженные уравнения имеют локальный характер, это относится и к причинным соотношениям. В то же время для линейных уравнений переноса плотности вероятности (прямое и обратное уравнения Колмогорова) причинно-следственные соотношения имеют глобальный характер.

Литература

1. X. San Liang, A Study of the Cross-Scale Causation and Information Flow in a Stormy Model Mid-Latitude Atmosphere // Entropy, 2019, 21, 149.
2. X. San Liang, The Liang-Kleeman Information Flow: Theory and Applications // Entropy 2013, 15, 327-360.
3. R. Kleeman, Information flow in ensemble weather prediction // J. Atmos. Sci., 2007, vol. 64, no. 3, 1005–1016.
4. T. Schreiber, Measuring information transfer // Phys. Rev. Lett., 2000, vol. 85, no. 2, p. 461–464, arXiv:nlin/0001042v1, 2000.
5. Subhrajit Sinha and Umesh Vaidya, On Information Transfer in Control Dynamical Systems, arXiv:1704.05370v2, 2018.
6. Subhrajit Sinha and Umesh Vaidya, On Data-Driven Computation of Information Transfer for Causal Inference in Dynamical Systems, arXiv:1803.08558v1 2018.
7. Алексеев А.К. О глобальной линеаризации и связи оператора Купмана – Карлемана с нейросетями // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях–2017 : труды V Всероссийской конференции. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2017, с. 18–20.
8. Ahmad Chaddad, Marco Pedersoli, Eric Granger, Christian Desrossiers, Matthew Toews, Modeling Information Flow Through Deep Neural Networks, arXiv:1712.00003v1, 2017.
9. Hiley B. J., From the Heisenberg Picture to Bohm: a New Perspective on Active Information and its relation to Shannon Information // Proc. Conf. Quantum Theory: reconsideration of foundations; ed. A. Khrennikov, p. 141–162, Växjö University Press, Sweden, 2002.
10. *Алексеев А.К.* О ценной информации в задачах усвоения данных наблюдений // Нелинейная динамика когнитивных исследованиях-2015 : труды IV Всероссийской конференции. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 16–18.
11. *Алексеев А.К., Бондарев А.Е.* О ценной информации в обратных задачах и ее визуализации : препринт ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. № 34.
12. *Бонгард М.М.* Проблема узнавания. М. : Мир, 1967. 319 с.
13. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. Динамическая теория информации М. : УРСС, 2004. 287 с.
14. *Марчук Г.И.* Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М. : Наука, 1992. 336 с.
15. *Теребиж В.Ю.* Введение в статистическую теорию обратных задач. М. : Физматлит, 2005. 375 с.
16. *Calmet X., Calmet J.* Dynamics of the Fisher information metric // Phys. Rev. E. 2005. V. 71 (5). 056109.
17. Predrag Cvitanovic and Domenico Lippolis, Knowing when to stop: How noise frees us from determinism, arXiv:1206.5506v1 2012.
18. *Granger C. W. J.* Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods // Econometrica. 1969. 37 (3): 424–438.
19. Pierre-Olivier Amblard and Olivier J.J. Michel, The relation between Granger causality and directed information theory: a review, arXiv:1211.3169v1 2012.
20. *Marchuk G.I., Shutyaev V., Bocharov G.,* Adjoint equations and analysis of complex systems: Application to virus infection modeling // J. Comput. Appl. Math. 2005. 184. 177–204.
21. *Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В.* Экстремальные методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1988.
22. *Колмогоров А.Н.* Три подхода к определению понятия «количество информации» // Проблемы передачи информации. 1965. Т. 1, вып. 1. С. 3–11.
23. *Kailash Budhathoki and Jilles Vreeken*, Causal Inference by Stochastic Complexity, arXiv:1702.06776v1, 2017.
24. *R. Solomonoff*, A Preliminary Report on a General Theory of Inductive Inference, Technical Report ZTB-138; Zator Company. Cambridge, MA, USA, November 1960.
25. *Hovland P., Mohammadi B. and Bischof C.* Automatic Differentiating and Navier-Stokes Computations, CRPC-TR97768-S, 1997.

Постулаты теории мышления и их следствия. Часть первая

В.А. Антонец

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского; antonetsva@gmail.com
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород; antva@appl.sci-nnov.ru

Введение и постановка проблемы

В предлагаемой работе делается попытка идентификации объективно подтвержденных фактов и использования их как постулатов для логического построения теории мышления (человека), полагая, что оно подчиняется неким фундаментальным законам. Эта теория должна обладать теми свойствами, которыми обладают теории в науках, называемых естественными.

Во-первых, она должна использовать небольшое количество фундаментальных фактов, которые можно было бы принять как постулаты.

Во-вторых, из этих постулатов логическим путем, который и есть теория, должны следовать объяснения уже известных свойств мышления. При этом, как и в естественнонаучных теориях, каждый из множества разрозненных фактов должен оказаться лишь проявлением или конкретной реализацией фундаментальных законов в конкретных условиях. Скажем, теория тяготения объясняет и падение предметов на Землю, и непадение на нее Луны и искусственных спутников, и приливы океанов и морей, и орбиты планет, и неоднородное распределение вещества в видимой части Вселенной.

В-третьих, теория должна предсказывать не идентифицированные еще свойства мышления, т. е. предложить идеи новых экспериментов, отрицательный результат которых мог бы ее опровергнуть.

Традиционно исследованием мышления занимаются психологи. Ими добыта и введена в научный оборот подавляющая часть эмпирических данных в области исследований мышления. Ими весьма тщательно проработаны вопросы постановки психологического эксперимента, включая этические аспекты. Им принадлежит и основная часть определений и развитых понятий, вполне успешно используемых в разных видах практики. Ими даже разработаны методы психологической манипуляции (управления) [1], создающие впечатление владения методами предсказаний. При этом психологи постоянно озабочены необходимостью разработки общего теоретического базиса и наведения терминологического порядка в своей науке [2].

Даже подступиться к этому мощному и объемному научному заделу – арсеналу психологической науки, уж не говоря о том, чтобы достаточно полно его освоить,– представителю других наук не по силам. Невольная робость и даже страх охватывают желающего вмешаться в решение проблемы мышления, которая в психологии обозначена как самая сложная проблема современной науки вообще.

Однако есть и 3 успокаивающих соображения.

Во-первых, не весь этот арсенал может потребоваться, так как в составе его заведомо содержатся тождественные, с точки зрения будущей теории, факты и связи.

Во-вторых, некоторые определения и понятия психологической науки о мышлении, введенные психологами за полтора-два века их профессиональной научной деятельности после обозначения границы с философией, могут оказаться симптоматическими, т. е. не общими, не существенными для теории. Некоторые же могут оказаться и вовсе ошибочными. Поэтому, возможно, следует при построении теории не придерживаться непременно этих определений и понятий, а модифицировать их, наполнять иным содержанием или даже отвергнуть. По крайней мере, таков методологический опыт физики с такими фундаментальными понятиями, как теплород, эфир и др.

В-третьих, в этом арсенале может не хватать знаний из других наук. То есть в рамках канонической психологии проблема может оказаться неразрешимой.

Некоторые методологические вопросы

Первый шаг, который придется сделать, – это попытаться модифицировать методологический подход так, чтобы он вмещал в себя основанные на фактах постулаты, логические следствия принятых постулатов, а также гипотезы, допускающие экспериментальную проверку.

При этом будем придерживаться совета Ю. И. Неймарка [3] и рассматривать не слишком сложные модели. Они не дадут деталей, но дадут ви̇дение. Поэтому мы займем такую генеральную позицию: машина мышления не слишком сложна, но ее трудно увидеть из-за множества режимов ее работы, которые, собственно, и есть проявления психики.

Например, трудно представить человека, который не понимает, как устроен автомобиль: мотор, колеса, рулевое управление и тормоз. Дальше идут тысячи необходимых и не очень деталей, которые обеспечивают работу всего этого хозяйства. Но боже упаси начать их рассматривать! Тогда уж вы точно не будете знать, как устроен автомобиль! Знакомый грузинский автомеханик сказал мне как-то: «Слушай, машина такой сложный вещь, что в нем никогда все исправный не бывает!»

Второй шаг – не противопоставлять, а объединять проблемы естественного и искусственного интеллекта. Это может помочь увидеть то важное, что отдельно в каждой из этих систем увидеть трудно.

Перейдем теперь непосредственно к попытке формулирования постулатов, их аргументации и выводов из них.

Постулат №1:

Формирование основных понятий, которыми человек оперирует в своей умственной деятельности, может происходить спонтанно без прямого участия сознания и без мотивации путем обобщения потоков информации в процессе накопления жизненного опыта. Понятие, отражаемое лингвистически, возникает путем осознания и присвоения имени уже готовому обобщению и только после этого поступает в оборот сознательной деятельности.

Аргументы и мотивы 1

1.1. В 2012 году компанией Google была создана система (сеть) из 16 000 компьютерных процессоров, обеспеченная доступом в Интернет и возможностью обучаться самостоятельно [4]. Изучив около 10 миллионов цифровых изображений, взятых на сервисе YouTube, нейронная сеть обучила себя распознавать изображения кошек. Она самостоятельно смоделировала изображение кошки, которое получилось намного более точным, чем ранее с другими объектами в ходе аналогичных экспериментов. При этом руководитель эксперимента Джефф Дин, из исследовательской лаборатории Google отметил: «Мы никогда не говорили сети в процессе тренировок: „Это кошка“. Таким образом, машина фактически сама изобрела для себя концепцию (категорию. – *В. А.*) кошки» [5].

1.2. Так как эта сеть заведомо не обладает способностью «думать», какое бы определение мы не давали этой способности, то действительно получается, что формирование обобщения «категория» может происходить без участия сознания, а следовательно, спонтанно и без мотивации.

1.3. Способность формировать «категории» давно обнаружена у животных. В частности, в известном исследовании голуби проявили способность сортировать изображения на содержащие и не содержащие в своем составе деревья.

Определение

Совокупность областей функционального пространства когнитивной деятельности мозга, где формируются и хранятся обобщения, определим как cognitive loft (CL), или когнитивный чердак, склад (КЧ).

Следствия 1

Из сформулированного постулата логическим путем возникают как очевидные, так и неожиданные следствия, в частности следующие.

1.1. На когнитивном чердаке может храниться некоторое количество неосознанных обобщений, которые, однако, могут использоваться субъектом в ходе формирования им активных действий, в частности при принятии решений.

Этот запас смотрится как неосознанный жизненный опыт. Если уж такой запас способна создавать сеть компьютеров, то очевидно, он есть не только у человека, но и у животных. Про человека мы знаем, что он может осознавать хотя бы часть своего жизненного опыта. Про животных мы этого твердо не знаем. Этот запас является хорошим кандидатом на то, чтобы быть «рабочим телом» Системы 1 Д. Канемана, обеспечивающей быстрое принятие (интуитивных) решений [6].

1.2. Вне зависимости от способа попадания неосознанного обобщения на когнитивный чердак субъекта – путем ли накопления собственного жизненного опыта, путем ли инжекции от собеседника – при осознании эти обобщения обладают для субъекта когнитивной деятельности эквивалентной новизной, и он воспринимает их как сделанные им самим. В обыденной бытовой и профессиональной, в особенности научной, жизни это часто проявляется, как споры о приоритете.

1.3. Так как формирование обобщения «категория» может происходить спонтанно, без мотивации и без прямого участия сознания, т. е. на основании жизненного опыта, каждый когнитивный чердак в силу ограниченности и специфичности этого опыта может быть ограничен в разнообразии типов обобщения. Если говорить лапидарно – не всякое обобщение и не на всяком чердаке может возникнуть. Когнитивные чердаки людей с разным социокультурным и историческим опытом могут иметь как сходные, так и различающиеся типы обобщений.

В качестве примера приведем цитату из области искусствоведения: *«… антрополог Мелвилл Херсковиц и его коллеги доказывали, что наш визуальный опыт не возникает из непосредственного контакта с реальностью, а формируется системой непрямых умозаключений. К примеру, человек, живущий в «мире плотника», то есть в такой культуре, где вещи по большей части создаются при помощи пилы и топора, привыкает трактовать острые и тупые углы, воспринимаемые нашей сетчаткой, как производные от прямоугольных объектов (на этом среди прочего основана условность изобразительной перспективы). Человек, выросший в культуре, где … прямоугольных объектов гораздо меньше, воспринимает мир иначе и, в частности, не понимает условностей изобразительной перспективы»* [7].

Указанное свойство обобщений является причиной возникновения трансляционных коммуникативных барьеров, проявляющихся в самых разных видах социальной деятельности от взаимодействия представителей различных страт общества до межкультурного взаимодействия стран и цивилизаций. Безусловно, утверждение представляется весьма простым, но, на взгляд автора, предложенный контекст позволяет яснее увидеть тяжесть проблемы коммуникаций и указывает на то, что ее решение в каждом конкретном случае должно начинаться с обмена ценностными представлениями [8].

Комментарии 1

1.1. Хотя обобщение «категория» в обычных условиях может происходить без мотивации и учителя, это не значит, что мотивация и наличие учителя не могут влиять на результаты обобщения. В той же работе [7] отмечено: «*Баксандалл (Майкл) усложнил этот подход. ... Зритель Баксандалла живет в социуме, в котором складываются его навыки визуального восприятия; какую-то их часть он усваивает пассивно, а какой-то овладевает активно и сознательно, чтобы потом использовать эти навыки в целом ряде социальных практик*».

1.2. Спонтанный процесс обобщения, по-видимому, носит динамический характер, и приходит к состоянию, похожему на стационарное. Всякий раз при распознавании объектов это стационарное состояние воспроизводится из когнитивного чердака и сличается с внешним потоком данных, и при этом несколько изменяется.

1.3. Формирование когнитивного обобщения «категория» является спонтанным процессом отражения внешнего потока и, возможно, комбинаций потока внешних данных и осознанных и неосознанных обобщений, хранящихся на когнитивном чердаке.

Постулат №2:

Сеть из нейронов не является единственно возможным субстратом когнитивной деятельности.

Аргументы и мотивы 2

2.1. Построенная Google система, самостоятельно научившаяся распознавать кошек и сгенерировавшая «категорию» «кошка», включала в свой состав исключительно неорганические элементы, сходные с нейроном тем, что они являются мультистабильными.

2.2. Система сходна с нейронной сетью наличием возможности устанавливать взаимовлияющие связи между мультистабильными элементами.

2.3. Система не пользовалась указаниями «учителя» и не имела мотивации для обучения.

2.4. Система (сеть) и ее элементы являются техногенными объектами, созданными по определенному замыслу изобретателей, обеспечившему эту сеть энергией, термостатом, мультистабильными элементами, коммуникационными каналами между ними и доступом к потоку внешней информации из сети Интернет.

Следствия 2

Использование второго постулата приводит к возникновению новых следствий.

2.1. Нейронный субстрат не является обязательным элементом осуществления, по крайней мере некоторых видов, когнитивной деятельности, например, связанной с формированием обобщения «категория», т. е. это, скорее всего, результат функциональной, а не биологической организации.

2.2. Постулат №1 применим и к искусственным системам. Существование неосознанных обобщений (следствие 1.1.) и эквивалентность новизны обобщений при их осознании (следствие 1.2.) распространяется и на когнитивные чердаки искусственных систем.

2.3. Когнитивные чердаки искусственных систем с разным «социокультурным и историческим» опытом могут не совпадать, т. е. иметь как сходные, так и различающиеся типы обобщений.

Постулат №3:

На когнитивном чердаке возможны дальнейшие итерации обобщений из уже сформированных обобщений и потока новой информации. В повторном обобщении могут участвовать как осознанные, так и неосознанные обобщения.

Аргументы и мотивы 3

3.1. Реально упомянутая система компании Google занималась не обобщением изображений, как это делает человек, по его мнению, а обобщением кодов.

3.2. Всякое обобщение типа «категория» очевидно представляет собой код.

3.3. У человека и животных уже на первом шаге внешние и внутренние рецепторы преобразуют физико-химические воздействия в потоки электрических и химических сигналов.

Следствия 3

3.1. Если первичные обобщения отражают реальный окружающий мир, включающий его природную, техногенную и социогенную компоненты, то последующие итерации могут привести к возникновению виртуальных правдоподобных обобщений, т. е. к проявлению воображения, обеспечивающего творческий процесс развития техногенного, социального и художественного мира.

3.2. Связей между нейронами так много, что виртуальный мир воображения может оказаться больше отражаемого мира реальности. В виртуальном мире может существовать полная свобода воли.

3.3. По-видимому, работа по вторичному обобщению хранящихся на когнитивном чердаке обобщений, так же как и в случае первичного обобщения, происходит спонтанно. Однако сознание каким-то образом стимулирует итерации, возможно имитируя напряжение, идущее от реального внешнего мира. Также оно производит отбор «удачных и неудачных» результатов итерационных обобщений. Это будем считать безусловным признаком «умения думать».

3.4. Творческий акт всегда совершается в виртуальной вселенной и лишь затем осознается и выражается на каком-либо носителе в виде текстов, изображений и др.

Комментарии 3

3.1. По-видимому, происходит и обобщение проприорецептивного потока информации, т. е.

формирование на чердаке моторных и иных вегетативных обобщений, обладающих всеми свойствами обобщений внешнего потока, в частности, пригодностью для участия во вторичных итерационных обобщениях, что может реализовывать связку «в здоровом теле здоровый дух».

3.2. Так как проприорецептивные образы существуют, то спорт – безусловное умение думать, хотя существуют и накатанные связки в различных видах гимнастики, и комбинации (стандарты) в индивидуальных и коллективных противоборствах.

Постулат №4:

Человека обладает, как минимум, двумя относительно независимыми системами сознания.

Аргументы и мотивы 4

4.1. Мы не только осознаем окружающий мир и себя, но и осознаем, что умеем делать это. Это больше, чем пройти «зеркальный тест» Гэллапа на самоопознавание [9], используемый для оценки самосознания животных.

4.2. Как бы мы ни определяли сознание, его механизм основан на том же субстрате, что и механизм формирования обобщений типа «категория» – на использовании нейронной сети.

4.3. Как бы мы ни определяли сознание, его механизм сам является кодом и работает с кодами. Таким образом, одно сознание и может осознать наличие другого.

4.4. Так как нейронная сеть необыкновенно велика, то размещение в ней дополнительного механизма сознания не должно представляться невозможным.

Следствия 4

4.1. Раз есть осознание существования сознания, значит, есть отражающая его структура.

4.2. Так как сознание и отражающая его структура могут быть сделаны только на основе одинакового субстрата и сходной организации, то они должны быть приблизительно равноправны. Значит, мы сталкиваемся не с ситуацией «сознание – отражающая структура», а с ситуацией «сознание – сознание», т. е. существованием, как минимум, двух примерно равноправных сознаний.

4.3. По-видимому, существует динамический процесс взаимодействия сознаний, в разных ситуациях ведущий к преобладанию одного или другого.

4.4. Вообще говоря, сознаний может быть и больше двух.

4.5. Вообще говоря, каждое из сознаний может предпочитать разные выборки обобщений, хранящиеся и формирующиеся на когнитивном чердаке. Это может приводить к смене поведения человека при смене превалирующего сознания.

4.6. Прайминг поведенческого порядка может быть связан с воздействием на конкурентную динамику сознаний.

4.7. Динамическое состояние, характеризующееся отсутствием превалирования одного из сознаний над другим, ведет к патологическому раздвоению.

Комментарии 4

Ситуация «сознание – сознание» делает возможным внутренний диалог, подобный диалогу между двумя человеками, когда «разум обращается к разуму, а не к ушам» [10].

Заключение

Автор осознает несовершенство сделанной попытки, но, тем не менее, видит в ее результате пользу, связанную с демонстрацией предлагаемого подхода. Он позволил получить не только очевидные, но и достаточно неожиданные выводы, которые могут позволить сформулировать новые задачи и новые интерпретации известных фактов.

Литература

1. *Thaler, Richard H.; Sunstein, Cass R.* Nudge: Improving Decisions about Health, Wealth, and Happiness. Yale University Press, 2008. 312 с.
2. *Аллахвердов В.М.* Размышление о науке психологии с восклицательным знаком. СПб. : Формат, 2009, 264 с.
3. *Неймарк Ю.И.* Математическое моделирование как наука и искусство. Изд. 2-е, испр. и доп. Нижний Новгород, Изд-во ННГУ, 2010. 404 с.
4. https://www.factroom.ru/facts/21207.
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Jeff_Dean_(computer_scientist)
6. *Канеман Д.* Думай медленно... Решай быстро. М. : АСТ, 2017. 656 с.
7. *Мазур Н.* Как увидеть искусство глазами его современников. https://arzamas.academy/courses/59/3.
8. *Антонец В.А., Левчук И.В.* Субъективная оценка значимости семантически разнородных объектов при транзакциях обмена // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 75–82.
9. *Gallup G.G. Jr.* Chimpanzees: Self recognition // Science. 1970. Vol. 167, № 3914. P. 86–87.
10. *Casanova G.* Mémoires de J. Casanova de Seingalt, écrits par lui-même. Tome Premier. Paris : Garnier Frères, 1880. P. 10.

Выявление направления связи в ансамблях нейроосцилляторов по их временным рядам методом частной направленной когерентности

Д.И. Астахова[1], М.В. Сысоева[2,3] , И.В. Сысоев[1,3]

[1]Саратовский национально исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
email: astakhovadi@mail.ru
[2]Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
[3]Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Введение

Взаимодействие между нейронными системами активно изучается в настоящее время. Основным источником информации об их динамике являются электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и магнитоэнцефалограммы (МЭГ). Для исследования связанности применялись самые различные меры, как линейные, так и нелинейные. Значительное внимание уделялось сопоставлению линейных и нелинейных мер, а также исследованию синхронизации в мозге. Накоплен значительный фактический материал по детектированию связанности между структурами мозга во многих специфических случаях, например, для изучения математических способностей, при абсансной эпилепсии, височной эпилепсии средней доли, при паркинсонизме.

Поэтому одним из актуальных направлений современной науки является поиск новых методов анализа измеряемых сигналов. Соответствующие методы анализа позволяют выявить направленность и силу потока информации. В последние десятилетия были предложены различные подходы к оценке связи между системами различной природы, в том числе методы направленной оценки связи биологических данных. Одним из перспективных методов анализа является метод частной направленной когерентности (PDC).

В работе представлен новый частотно-разрешённый подход к описанию взаимосвязей (направления информационного потока) между многомерными временными рядами, основанный на декомпозиции многомерных частных когерентностей, вычисленных по многомерным авторегрессионным моделям. Метод был введен в 1999 году группой Луиса Баккала [1] специально для работы с нейробиологическими сигналами [2]. Было объявлено, что PDC показывает прямое влияние одного временного ряда на другой, не показывая косвенных связей. Данный метод основан на построении моделей линейного прогнозирования, неизвестные коэффициенты которых оцениваются методом наименьших квадратов:

$$\begin{bmatrix} x_1(n) \\ \vdots \\ x_N(n) \end{bmatrix} = \sum_{r=1}^{p} A_r \begin{bmatrix} x_1(n-r) \\ \vdots \\ x_N(n-r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1(n) \\ \vdots \\ w_N(n) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $x_i(n)$ – исходный векторный временной ряд, состоящий из N скалярных рядов (от N осцилляторов, возможная связь между которыми исследуется) и измеренный с шагом выборки Δt, p – число предыдущих моментов времени, учтённых в модели и, как следствие, число матриц A_r, A_r – матрицы коэффициентов авторегрессионных моделей, состоящие из коэффициентов $a_{i,j}(r)$, оцениваемых в типичном случае методом наименьших квадратов. Элементы матрицы $a_{i,j}(r)$ представляют собою линейное влияние сдвинутого во времени на $r\Delta t$ j-го ряда на i-й ряд в текущий момент времени n. i, j – номера осцилляторов, r – сдвиг во времени.

Затем коэффициенты, зависящие от времени, преобразуются в коэффициенты, зависящие от частоты с помощью z-преобразования

$$A(f) = \sum_{r=1}^{p} A_r z^{-r} \Big|_{z=e^{-i2\pi f}}, \quad (2)$$

и находится дополнительная матрица:

$$\overline{A}(f) = (E - A(f)), \quad (3)$$

где f – частота, а E – единичная матрица.

И наконец, рассчитывается PDC:

$$PDC_{ij}(f) = \frac{\overline{a}_{ij}(f)}{\sqrt{\overline{a}_j^{H^*}(f)\,\Sigma^{-1}\,\overline{a}_j(f)}}, \quad (4)$$

где H* – операция эрмитова сопряжения (взятие комплексного сопряжения элементов плюс транспонирование). Поэтому эффективность этого метода для нелинейных систем неочевидна.

Цель настоящего исследования – определить, будет ли этот метод правильно определять направленное взаимодействие нелинейных по природе систем, определять параметрическую нелинейную связь, а также проверить зависимость результатов оценки связанности методом частной направленной когерентности от параметров метода: длины реализации, частоты дискретизации, размерности модели и от архитектуры связей в системах.

Тестовые системы

Чтобы воспроизвести основные возможные ситуации (однонаправленную связь, двунаправленную связь, отсутствие взаимодействия, опосредованное воздействие), для каждого типа систем было сделано по 4 осциллятора. Осцилляторы связывали несколькими способами: 1) первый воздействует на второй, третий и первый взаимно влияют друг на друга, четвёртый осциллятор колеблется изолированно, при такой архитектуре связей можно проверить, как метод реагирует на опосредованную связь с третьего на второй

осциллятор; 2) две пары двунаправленно связанных осцилляторов (первый со вторым и третий с четвёртым); 3) кольцо из трёх осцилляторов, а четвёртый вновь изолированный. Схематически эти зависимости могут быть представлены, как показано на рис. 1.

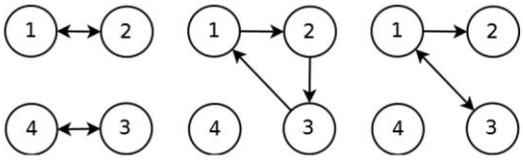


Рис. 1. Архитектуры связей

Линейный осциллятор

Так как мера является линейной, логично, что мы начнем тестировать ее на примере линейной системы с линейной связью:

$$\ddot{x}_i(t) + 2\gamma_i \dot{x}_i(t) + \omega_{0,i}^2 x_i(t) = k_{i,j} x_j(t). \quad (5)$$

Коэффициент связи $k_{1,j} = 0.65$, $k_{2,j} = 0.75$, $k_{3,j} = 0.95$, $k_{4,j} = 0.0$, $r_1 = 0.01$, $r_2 = 0.08$, $r_3 = 0.03$, $r_4 = 0.07$.

Уравнения интегрировались методом Эйлера с шагом $h = 0.01$, поскольку в систему вводился гауссовский шум со среднеквадратичным отклонением $\sigma_n = 0.02\sigma_s$, где σ_s – среднеквадратичное отклонение сигнала.

Система Фитц-Хью – Нагумо

Усложним задачу и введем линейную систему с нелинейной связью. Например, систему из 4 связанных осцилляторов Фитц-Хью – Нагумо (FHN):

$$\dot{x}_i = x_i(a_i - x_i)(x_i - 1) - y_i + I_{a,i} + \sum_{j \neq i} k_{i,j} x_j,$$
$$\dot{y}_i = \beta_i x_i - \gamma_i y_i. \quad (6)$$

Коэффициент связи $k_{1,j}$=0.35, $k_{2,j}$=0.38, $k_{3,j}$=0.39, $I_{a,i} = 0.85$, $\alpha_i = 0.8$, коэффициент β менялся от 0.15 до 0.17, а коэффициент γ – от 0.06 до 0.068.

Уравнения интегрировались методом Эйлера с шагом $h = 0.01$, поскольку в систему вводился динамический шум со среднеквадратичным отклонением $\sigma_n = 0.02\sigma_s$, где σ_s – среднеквадратичное отклонение сигнала.

Нелинейно связанные генераторы с жестким возбуждением и потенциалом Тоды

Усложним систему и введем нелинейный осциллятор с нелинейной связью. Данную систему можно назвать осциллятором с жёстким возбуждением и потенциалом Тоды (далее сокращенно «ж/в – Тоды»)

$$\ddot{x}_i - (r_i + k x_j^2 - x_i^4)\dot{x}_i + \omega_i^2(1 - e^{-x_i}) = \xi_i(t), \quad (7)$$

где i – номер текущего осциллятора, j – номер воздействующего осциллятора, коэффициент связи $k_{i,j} = 0.65$, $r_1 = -0.05$, $r_2 = -0.08$, $r_3 = -0.06$, $r_4 = -0.07$, $\xi_i(t)$ нормальный белый шум с дисперсией $\omega_i = 0.25$, шаг равен 0.01.

Результаты

У нас есть четыре изменяющихся показателя: частота дискретизации, длина реализации, количество временных сдвигов и архитектура связей. Также есть три системы, для которых рассчитывалась PDC: линейный осциллятор, FHN, «ж/в – Тоды».

На рис. 2 представлен типичный график, построенный по временным реализациям линейного осциллятора. Для линейного осциллятора мера при всех наборах параметров правильно выявляет заложенную архитектуру связей: правильно определяется одно- и двунаправленное воздействие, не определяются опосредованные связи, PDC для изолированного узла ведёт себя адекватно.

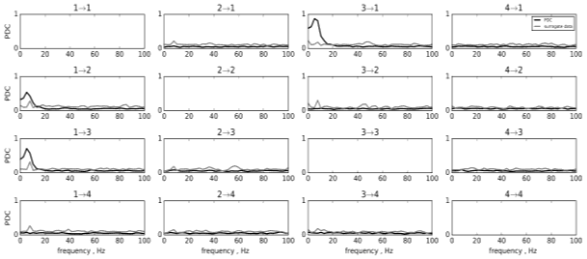


Рис. 2. PDC для линейного осциллятора, с архитектурой связей 1→2, 1↔3. Частота дискретизации 512 Гц, временной ряд длиной 50 с, количество анализируемых предыдущих значений – 100

Для осциллятора Фитц-Хью – Нагумо мера при всех наборах параметров правильно выявляет заложенную архитектуру связей: правильно определяется одно- и двунаправленное воздействие, однако определяются опосредованные связи для некоторых примеров, PDC для изолированного узла ведёт себя адекватно (рис. 3).

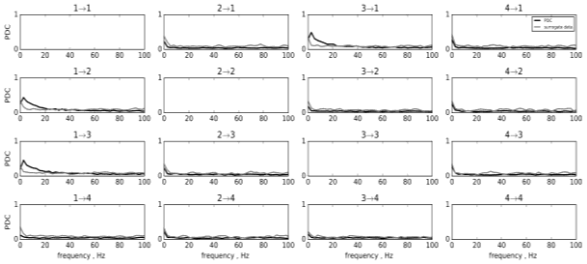


Рис. 3. PDC для осциллятора Фитц-Хью – Нагумо, с архитектурой связей 1→2, 1↔3. Частота дискретизации 512 Гц, временной ряд длиной 50 с, количество анализируемых предыдущих значений – 100

Для нелинейно связанных генераторов с жестким возбуждением и потенциалом Тоды есть специфическая особенность: очень высокий уровень PDC для изолированного узла, хотя суррогатный уровень тоже высокий, поэтому влияние со стороны изолированного осциллятора всё же оказывается незначимым (рис. 4). Это происходит из-за того, что мы используем оригинальный метод подсчёта PDC, который чувствителен к отношению дисперсий рассматриваемых сигналов. Из-за того, что у изолированного осциллятора «ж/в – Тоды» низкая амплитуда колебаний в сравнении с остальными осцилляторами системы, наблюдается высокий уровень PDC со стороны этого узла на другие и, наоборот, очень низкий уровень PDC на этот узел. Этот эффект подробно рассмотрен в работе [3].

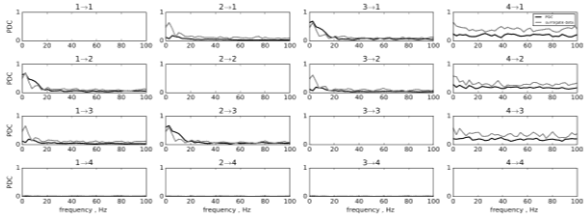


Рис. 4. PDC для осциллятора «ж/в – Тоды», с архитектурой связей 1→2, 1↔3. Частота дискретизации 512 Гц, временной ряд длиной 50 с, количество анализируемых предыдущих значений – 100

Основные выводы

- Зависимость от структуры связей.

Лучше всего метод работает при взаимодействии в парах. Хуже всего – в кольце (как было показано на примере «ж/в –Тоды»). Изолированные узлы показывают высокое (хотя часто незначимое по суррогатам) влияние на другие узлы, низкое на них и умеренное между ними (из-за чувствительности метода к дисперсии сигнала).

- Зависимость от частоты дискретизации.

При низкой частоте выявляются случайные значимые связи на произвольных частотах (как правило, равномерно распределены в частотном диапазоне). При высокой частоте метод начинает показывать опосредованные связи как непосредственные.

- Зависимость от длины реализации.

Истинные значения PDC не меняются с ростом длины ряда, а ложные и суррогатные падают (ведёт себя как классическая ненаправленная когерентность).

- Зависимость от размерности модели (числа используемых точек, максимального времени памяти и др.).

Сначала работоспособность метода улучшается (повышается чувствительность), а потом падает (специфичность утрачивается – появляются ложные связи на произвольных, по всему спектру, частотах).

Метод имеет свои достоинства и недостатки. Однако он неплохо показал себя в работе с тестовыми системами, поэтому его можно применять к реальным данным.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 17-02-00307.

Литература

1. *Sameshima K., Baccala L.A.* Using partial directed coherence to describe neuronal ensemble interactions // Journal of Neuroscience Methods. 1999. Vol. 94. P. 93–103.

2. *Takahashi D.Y., Baccala L.A., Sameshima K*. Connectivity Inference between Neural Structures via Partial Directed Coherence // Journal of Applied Statistics. 2007. Vol. 34(10). P. 1255–1269.

3. *Сысоева М.В., Медведева Т.М.* Оптимизация параметров метода причинности по Грейнджеру для исследования лимбической эпилепсии // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Vol. 26(5). P. 39–62.

Моделирование процессов оптимизации ресурсов нейрона как элемента самоорганизующихся динамических нейронных структур

А.В. Бахшиев[1,2], Л.А. Станкевич[2]

[1]Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики, С.-Петербург,
email: alexab@rtc.ru
[2]Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого,
email: stankevich_lev@inbox.ru

Введение

Многие подходы в решении задач, которые традиционно считаются прерогативой человеческого интеллекта, нашли подсказки или целиком были позаимствованы у живых существ (в том числе и человека). Однако моделирование столь сложной структуры, как нервная система животных и человека, «в лоб», с целью получить систему, обладающую способностями аналогичными тем, что считаются прерогативой человеческого интеллекта, представляется не перспективным. В отсутствие достоверных и исчерпывающих знаний о причинах именно такой организации структуры и функций мозга, какие они есть, потребовалось бы создать точную копию мозга, что не имеет смысла в перспективе создания нейроморфных систем.

Один из возможных путей создания нейроморфных систем обработки информации – попытаться путем анализа известных принципов организации и взаимодействия естественных нейронов предложить модель, объединяющую в себе эти принципы. Такой путь является продолжением теории искусственных нейронных сетей.

Более перспективным направлением представляется попытка проанализировать первопричины, по которым нейроны объединяются в группы, слои, и затем формируют отделы мозга, и попытаться создать модели нейронов и нейронных сетей, функционирующие по сходным принципам. Иными словами, необходимо попытаться найти то движущее начало, которое формирует нейронные структуры и заставляет их работать. Одним из таких фундаментальных свойств в живой природе является принципиальная неустойчивость биологической системы во времени, действующей против равновесия [1], что проявляется, в том числе, в необходимости удовлетворять постоянно растущие потребности организма [2].

Внесение в модели нейронов и нейронных сетей этого, и других свойств живой материи может позволить создать системы, в которых такой важные аспект как адаптивность к изменениям в среде будет являться следствием этих свойств, а не заложено искусственно. Также разработка таких моделей, позволит полнее понять принципы функционирования высшей нервной деятельности человека. Важную роль в создании таких систем играют мотивации, связанные с потребностями организма. В поведении животных мотивация служит для формирования цели и поддержки целенаправленных форм поведения. Ее можно рассматривать как активную движущую силу, которая стимулирует нахождение решения, адекватного потребностям животного в конкретной ситуации. Например, если организм голоден, он должен искать пищу.

Анализ проблемы

В настоящее время понятие мотивации, применительно к искусственным нейронным сетям, нашло свое развитие в методах обучения в подкреплении [3–5], однако известные недостатки таких подходов пока не были преодолены.

В работе [6] предлагается модель нейронного автомата, состоящая из нейронов, обладающих такими параметрами, как:

– возраст, или иначе, функционал полезности, отвечающий за рост потребления питания и снижаемый за счет генерации спайков;

– запас питания, расходуемый на генерацию спайков;

– самочувствие – интегральная характеристика, зависящая от запасов питания и тенденции к его изменению.

В начальных условиях такой автомат – это неорганизованное или слабо организованное множество нейронов, поставленных в условия ограниченного питания. Решается задача выжить за счет организации таких внутренних отношений между нейронами и отношений с внешним миром, когда потребности нейронов снижаются и в среднем автоматически поддерживаются на уровне возможностей питательной среды. Интеллектуальные свойства возникают как следствия организации различных энергетически выгодных топологий и режимов внутреннего функционирования.

Целью работы являлась разработка комплексной модели нейрона как компартментной модели обработки спайковых сигналов, представленной в [7, 8], интегрированной с представленной в работе [6] концепцией, которая должна обеспечить базовый механизм обучения таких нейронов.

Модель нейрона

Ниже представлена предложенная функциональная схема такой модели (рис. 1).

Моделируя процессы жизнеобеспечения нейрона, мы абстрагируемся от химии и физиологии протекающих процессов, аналогично моделированию процессов преобразования импульсных потоков.

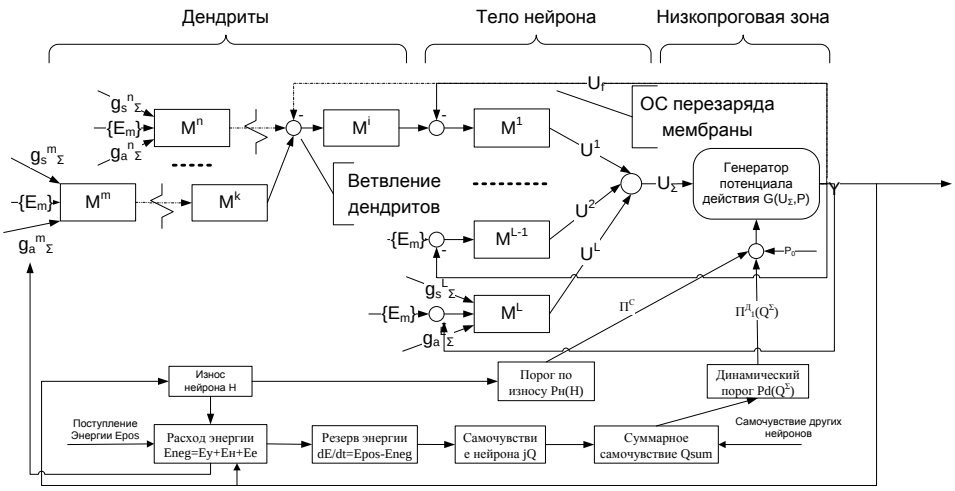


Рис. 1. Функциональная схема комплексной модели нейрона

Нас интересует моделирование качественных свойств нейрона, обеспечивающих выживание клетки в условиях симбиоза и конкурентной борьбы внутри нейронной сети. Введем два следующих базовых параметра – энергетический резерв нейрона и его износ.

Полагаем, что нейрон расходует энергию на генерацию импульсов. При наличии избытка энергии нейрон способен делиться, при потере всего запаса энергии нейрон погибает. Также полагаем суммарный запас энергии нейронной сети ограниченным. Таким образом, этот параметр ограничивает способность нейрона к генерации импульсов и является фактором конкурентной борьбы в сообществе нейронов.

Энергетический резерв E равен разности между величинами поступления энергии из общего резерва нейронной сети и суммарного расхода энергии на поддержание жизнедеятельности и генерации импульсов:

$$E(t) = E_+(t) - E_-(t).$$

Величина поступления энергии пропорциональна общему резерву сети E_Σ, и обратно пропорциональна числу нейронов в сети N. Положим:

$$E_+ = E_* \cdot \frac{E_\Sigma}{N},$$

где E_* – коэффициент, характеризующий степень важности этого нейрона для нейронной сети. В дальнейшем для простоты мы будем считать E_* = const.

Расход энергии $E_-(t)$ равен сумме расходов на генерацию импульса $E_y(t)$, на хранение резерва энергии $E_E(t)$ и потребление энергии на поддержание функционирования клетки, зависящей от степени износа $E_H(t)$:

$$E_-(t) = E_y(t) + E_E(t) + E_H(t).$$

Будем считать E_y пороговой функцией:

$$E_y(t) = \left|U_\Sigma(t)\right| \cdot E_{y0} \cdot t.$$

Расход энергии на хранение энергетического резерва определим экспоненциальной функцией:

$$E_E(t) = E_{E0} \cdot e^{kE \cdot E(t)} \cdot t.$$

Полагаем, что расход энергии на хранение энергетического запаса по превышению некоторого критического значения запаса энергии E_{cr} резко возрастает, выходя из приблизительно линейной области. Таким образом, становится невыгодно накапливать слишком большой запас энергии. Полагая E_{cr} таким, что $E_E(E_{cr}) = 2\,E_{E0}$, получаем выражение для k_E: $k_E = \dfrac{\ln 2}{E_{cr}}$.

Расход энергии в зависимости от износа клетки определим как

$$E_H(t) = E_{H0} \cdot (1 + e^{kH \cdot H(t)}) \cdot t.$$

Аналогично E_E существует некоторое критическое значение износа H_{cr}, по превышении которого расход энергии существенно возрастает.

В случае, если запас энергии нейрона E превышает заданный E_{max}, нейроны осуществляют деление. При этом имеющийся запас делится поровну между порождающим и порождаемым нейроном.

Таким образом, если количество энергии постоянно, то число нейронов сети не может существенно превысить некоторого $N_{\max}$, определяемого начальным числом нейронов и количеством энергии сети и достигаемого в период начального функционирования сети, когда износ нейронов близок к нулю.

Износ нейрона H определяет эффективность функционирования модели. Увеличение степени износа (старение нейрона) ведет к снижению эффективности расхода энергии на генерацию импульса. Процесс генерации импульса ведет к функциональному обновлению клетки, т. е. снижению степени износа. Таким образом, этот параметр определяет потребность клетки во взаимодействии с другими клетками для экономии ограниченного запаса энергии.

Износ нейрона определяется его временем функционирования и активностью изменения мембранного потенциала. Будем считать, что износ увеличивается на заданную величину каждую секунду:

$$H_+(t) = H_+^* \cdot t.$$

Вычитаем обновление нейрона за счет изменения мембранного потенциала (активности нейрона):

$$H_{-}(t) = H(t) \cdot \left[\frac{1}{1 + e^{-k_H \left| U_\Sigma(t) \right|}} - 0.5 \right] \cdot H_{-}^{*} \cdot t,$$

получаем

$$H(t) = H_0 + H_{+}(t) - H_{-}(t),$$

где H_0 – начальное значение износа, H_{+}^{*} – фиксированная прибавка к износу, H_{-}^{*} – коэффициент обновления, $k_H \in (0; \infty)$ – коэффициент эффективности обновления нейрона. Чем он выше, тем активность нейрона дает больший вклад в уменьшение износа.

Самочувствием нейрона назовем функционал $Q = Q(E, \dot{E})$. Единственной задачей модели нейрона является максимизация данного функционала. Положим

$$Q = Q_1(E) + Q_2(\dot{E}),$$

$$Q_1(E) = E - E_N,$$

$$Q_2(\dot{E}) = \left[\frac{1}{1 + e^{-k_Q \cdot \dot{E}}} - 0.5 \right] \cdot E_N,$$

где E_N – некоторое номинальное значение запаса энергии, при котором самочувствие нейрона нейтрально и равно нулю. При этом $E_N < E_H$, $E_N < E_E$.

Самочувствием нейронной сети будем называть взвешенную сумму значений функционала по всем нейронам:

$$Q_\Sigma = \sum_i \beta^i \cdot Q^i.$$

Будем считать $\beta \in [0,1]$.

Чтобы адаптировать рассмотренные понятия к модели спайкового нейрона [7], введем в модель порог P, зависящий от указанных выше переменных и определяемый как сумма динамического порога $P_d(Q_\Sigma)$, определяемого суммарным самочувствием нейронов сети, порога по износу $P_H(H)$ и статического порога P_0 = const:

$$P = P_d(Q_\Sigma) + P_H(H) + P_0.$$

Для упрощения выбора параметров модели порога преобразуем эту запись, переопределив динамический порог и порог по износу как вклад в изменение статического порога:

$$P = (P_d(Q_\Sigma) + P_H(H) + 1) \cdot P_0.$$

И будем полагать $P_0 = 0.001$ – константное значение порога в модели нейрона. Динамический порог будем описывать следующей зависимостью:

$$P_d(Q_\Sigma) = P_{d\max} \cdot \frac{1}{1 + e^{-k_P^d \cdot (Q_\Sigma - Q_d)}},$$

где Q_d определяет нормальный порог по самочувствию нейрона и полагается таким, чтобы $P_d(0) = P_{d0}$.

Порог по износу $P_H(H)$ представим следующей составной функцией:

$$P_H(H) = \begin{cases} e^{\frac{k_{P0}^H}{H}} - e^{\frac{k_{P0}^H}{H_{cr}}}, H < H_{cr} \\ -e^{k_{P1}^H (H - H_{cr})}, H \geq H_{cr} \end{cases}$$

где H_{cr} – критическое значение износа нейрона, при котором может начаться спонтанная генерация импульсов клеткой.

Вес k-й связи G_k, $k = \overline{1, M}$ нейрона складывается из динамической части G_{Dk} как прообраза кратковременной памяти и статической G_{Sk}, описывающей длительную историю (долговременная память):

$$G_k = G_{Dk} + G_{Sk}.$$

Правилом обучения нейронов примем правило Хебба.

Предложенная модель описывает основные информационно-физиологические свойства естественного нейрона, такие как износ нейрона, получение энергии нейроном из внешней среды, изменение мембранного потенциала под воздействием внешней среды и внутреннего состояния.

Эксперимент

Для проведения экспериментов на модели, необходимо рассмотреть взаимодействие нейронов в сети. В рамках работы рассматривалась многослойная сеть. Число нейронов в слое определяется числом генераторов (все нейроны 1-го слоя получаются подключенными к своему генератору), а общее число слоев равно числу нейронов сети, отнесенному к числу генераторов. У каждого нейрона есть координата в двухмерном пространстве сети. X – координата вдоль слоя, Y – координата вдоль списка слоев. При этом каждый нейрон связан только с теми, расстояния между которыми меньше или равны единице.

Если описать $v_1 = \{x_1, y_1\}$ $v_2 = \{x_2, y_2\}$ – векторы координат нейронов в пространстве сети, то расстояние будет считаться как эвклидово расстояние: $d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$.

В эксперименте рассматривалась возможность такой сети образовывать ансамбли.

Рассмотрим нейронную сеть, состоящую из 4 нейронов, где 2 нейрона (N, N2) являются сенсорными. Для формирования ансамбля активируем оба входа.

В течение 1 секунды формируется ансамбль из пары нейронов N+N2. На рис. 2 представлены реакции ансамблей, показана активность (средняя частота разрядов нейронов) ансамбля. Можно видеть, что при наличии возбуждения, формировавшего ансамбль, активность ансамбля держится на уровне ~5 Гц, тогда как при отсутствии возбуждения активность ансамбля стабилизируется на частоте ~10,5 Гц. Возможны промежуточные состояния (интервал времени 26–31 с), когда активируется только часть нейронов ансамбля.

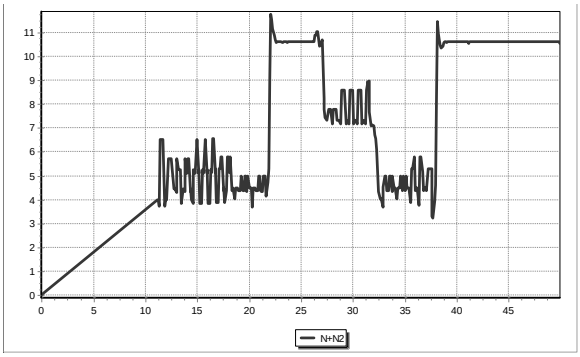


Рис. 2. Формирование и реакции ансамбля

Соответствующая средняя частота разрядов сети представлена на рис. 3.

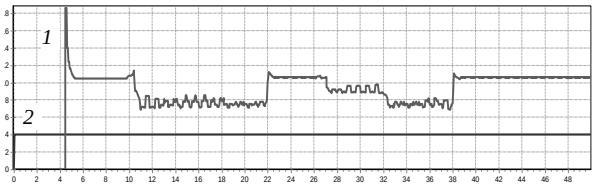


Рис. 3. Активность сети: *1* – средняя частота, *2* – всего нейронов

Заключение

Был проведен анализ структуры и функций биологического нейрона, изучены модели искусственных нейронных сетей и предложена схема разделения модели нейрона на два самостоятельных модуля: модель нейрона как преобразователя импульсного потока и нейрона как квазиживого объекта.

Разработана математическая модель такого нейрона, проведено исследование работы модели и анализ принципов организации нейронов в группы (ансамбли) под воздействием внешнего возбуждения различного характера.

В качестве направлений дальнейших исследований предполагается решение следующих задач:

1) детальное исследование взаимодействия ансамблей, их свойств и поиск способов их практического использования для решения частных задач, таких как, например, построение модели окружающей среды;

2) разработка методики переноса формально определяемых задач в пространство потребностей нейронной сети.

Работа проводилась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00924-19-00 «Разработка и исследование новых архитектур реконфигурируемых растущих нейронных сетей, методов и алгоритмов их обучения».

Литература

1. *Бауэр Э.С.* Теоретическая биология М.–Л. : ВИЭМ, 1935. 350 с.

2. *Шамис А.Л.* Пути моделирования мышления. Активные синергические нейронные сети, мышление и творчество, формальные модели поведения и «распознавания с пониманием». М. : КомКнига, 2006.

3. *Mnih V.* HumanLevel Control through Deep Reinforcement Learning // Nature. 2015.

4. *Wang Z., Schaul T.* Reinforcement Learning: An Introduction, arxiv.org:1511.06581, 2016.

5. *Lillicrap T.P., Hunt J.J.* Continuous control with deep reinforcement learning, arXiv:1509.02971, 2015.

6. *Емельянов-Ярославский Л.Б.* Интеллектуальная квазибиологическая система (Индуктивный автомат). М. : Наука, 1990. 112 с.

7. *Бахшиев А.В., Романов С.П.* Математическое моделирование процессов преобразования импульсных потоков в биологическом нейроне // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2009. №3. С. 71–80.

8. *Aleksandr Bakhshiev, Filipp Gundelakh*. Mathematical Model of the Impulses Transformation Processes in Natural Neurons for Biologically Inspired Control Systems Development // Supplementary Proceedings of the 4th International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts (AIST-SUP 2015). Yekaterinburg, Russia, April 9-11, 2015. Published on CEUR-WS, vol. 1452, pp. 1-12, 15.10.2015. Online: http://ceur-ws.org/Vol-1452.

Биологическая метрология познавательных функций

П.И. Белобров

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
email: peter.belobrov@gmail.com

1. Основные свойства нечисловых мер

В общем случае нечисловая мера не имеет отображения на числовую ось $\mathbb{R}$, обладая свойствами условности, высокой размерностью и зависимостью от измерителя. До сих пор нет канонической теории таких мер. Причину сформулировал Виктор Гюго: «Существует три ключика человеческого разума: число, буква, нота». Представьте себе меру, у которой есть цифровая компонента в виде пространства $\mathbb{R}^n$, несколько летописей на разных языках, музыка жизни и танцы под дудочку жизни (меры Нобла) [2, 3], литературно-художественные образы, запахи весны, напряжение всех клеток тела и пот скрипача, играющего на одной струне (мера Паганини), картины «Мона Лиза» и «Спаситель мира» (меры Леонардо да Винчи). И представьте обобщение всех этих мер на совместные биологические меры, склеенные из количественных мер Лебега и нечисловых мер Хаусдорфа высокой размерности.

Хотя идеи Нобла об отсутствии генетических, физиологических и функциональных программ были подвергнуты жесткой критике, мы полагаем, что он прав, и все биологические «программы» создаются самой живой системой в процессе развития. Как формируются функции большого числа биологических переменных, нигде не закодированные заранее, – надо выяснять, однако этот процесс постоянно происходит во время развития живых систем в собственном биологическом пространстве. Понимание сути достигается введением биологических мер, которые делают естественные пространства живых организмов измеримыми по этой мере опять-таки в естественных биологических переменных.

Теория меры допускает нечисловые переменные (Другие меры – УДК 517.518.114).

1.1. Принципы биологии требуют решения проблемы создания нового. Исследователи так долго искали количественное решение многих биологических проблем в рамках редукции, что забыли о существовании основных законов фундаментальной биологии.

Учитывая принципы биологии, заметим, что при описании различных сторон Природы обязательно присутствуют как количественные, так и нечисловые переменные. Нечисловые объекты, параметры и переменные существуют в каждой науке. Например, в математике – группы и топологии, в физике – частицы и поля, в химии – вещества и растворы. В каждой науке к существенным нечисловым переменным относятся образы, которые чаще всего формулируются в виде ключевых слов. Часто используются рисунки и фотографии. При описании биологических отношений необходимы понятия страстей, симпатий, эмоций. Состояния живых объектов выражаются такими нечисловыми характеристиками и свойствами, как рождение, развитие, созидание, беспокойство, творчество, язык, мышление. Поэтому применение только математических, физических и химических мер к живым объектам позволяет создавать лишь грубые модели процессов жизни, и без применения биологических мер полностью описать живое нельзя [4]. Логическое рассмотрение индивидуальности и целостности, беспокойных состояний и основных процессов при появлении нового (эмерджентности [1]) можно провести, вводя конструкцию слияния количественных и нечисловых мер и создавая новые совместные меры. Повышение размерности при созидании требует этого обязательно. Это предлагаемый нами путь решения проблемы создания нового в исследовательском ключе.

1.2. Условность нечисловых мер. Условные меры были введены Колмогоровым в 1936 году [5] и эффективно используются в теории вероятностей. Эта концепция, как одна из наиболее фундаментальных и наименее интуитивных, позволила Колмогорову ввести понятие алгоритмической сложности как длину алгоритма преобразования одного объекта в другой [6].

Важной характеристикой живой системы является условная энтропия, характеризующая неопределенность распределения состояний *биологической системы* относительно известного распределения, которое, как правило, кроме самой клетки никому обычно не известно. Именно этим определяется сложность преобразований одной клетки в другую и необходимость использования условных биологических мер [7].

Правильно было сказано, что для описания состояния живых систем существующие методы не подходят [8]. Рассмотрим вариант решения проблемы описания беспокойных состояний живого, когда происходит появление нового. Операторы условного ожидания и связанные с ними условные меры были рассмотрены с разных точек зрения как функциональные операторы и меры, оцениваемые в функциональном пространстве. Это предполагает, что анализ должен быть основан на пространствах общей меры, которые не должны быть конечными [9].

1.3. Совместные условные меры. Общая теория условных мер хорошо развита [10] и широко применяется для количественного анализа нечётких множеств [11], описания статистических свойств «ядерными» мерами условной зависимости [12], сравнения большого числа многомерных распределений [13] и построения условных мер

связи между сетевыми переменными [14]. Происходило одностороннее развитие условных вероятностных мер в применениях для количественных измерений статистических распределений. С другой стороны, несмотря на существование условных топологических мер [10] регулярное рассмотрение нечисловых мер отсутствует. До сих пор всё ограничивается компьютерным анализом образов.

1.4. В живых клетках происходят биологические процессы. Их глубина и сложность не только в алгоритмической сложности, которая годится для дискретных систем. В каждой клетке происходят удивительные процессы чтения и записи химических текстов органическими же читающими комплексами и надмолекулярными структурами. При этом все случайные одиночные события преобразуются в статистику ближайшим окружением, формируя при этом биологическое действие.

1.5. Смысл новой системы СИ. Точные значения фундаментальных квантовых единиц физической природы теперь заданы переопределенной системой СИ, которая 20 мая 2019 года вступила в силу. Это опять-таки не значит, что в живой клетке идут одни физические процессы, хотя исключение их – большая глупость. Через формирование химического смысла физического действия различных молекул и комплексов друг на друга формируется биологическая семантика понимания самой клеткой собственного состояния и биологического состояния окружающих клеток и тканей.

Идея применения мер Хаусдорфа для описания этих процессов вместе с повышением или понижением размерности согласованно с включением или выключением биологического действия была предложена, пожалуй, впервые в работе [15], правда, тогда не было ещё понимания, что действие и взаимодействие надо строго отличать, чтобы вместо медиаторов (действующих через окружение) не появлялись частицы – переносчики взаимодействия.

Размерность биологического пространства всех клеток живого организма, который размышляет, порядка числа Авогадро N_A. Каждая буква (молекула) находится в $\mathbb{R}^3$, их действие в таком пространстве, т. е. множество всех подмножеств внутреннего и межклеточного пространств за любой конечный интервал времени составляет множество мощности континуума. Очевидно, что существование алгоритмов в такой системе представить трудно. Разве что вообразить траектории нечисловых химических переменных в ∞-мерном биологическом пространстве, которые сами себе пишут коды для ближайших последующих состояний, что уже само по себе фантастика.

2. Меры искусственного интеллекта

Полвека назад Биркгоф показал [16], что «компьютерное мышление» невозможно без учета тонкой природы разума и в силу причин, которые на «цифровой заре» были заметнее. Основные причины были названы: конечное дискретное множество внутренних состояний процессора, отсутствие континуума значений собственных переменных. Поэтому в компьютерах нет иррациональных чисел. Отсутствие натурального ряда не позволяет точно представить счётные множества и несоизмеримые отношения. Развитие дискретной и символьной математики привело к сильному прогрессу в анализе дискретных переменных. Противоречие конечной размерности логических элементов компьютера с континуумом значений и счетной размерностью переменных живых систем привело Биркгофа к мысли о необходимости совместной работы «искусственного» и живого интеллектов.

Так поступил Google, стоящий на точке зрения Биркгофа [16] и создавший прекрасные меры μ_{SG}, которыми все мы постоянно пользуемся при поиске статей, образов, патентов, делаем анализ цитируемости, и реализуем многие познавательные функции интеллектуальной активности.

2.1. ИИ в «Индустрии 4.0». Хотя у ИИ нет реального мышления, но это не мешает развитию визуальных языков программирования, позволивших получить новые результаты при анализе биологических образов клеток, тканей, органов, что помогает исследователям создавать новые биологические меры.

Недавно было создано приложение для количественного анализа сложных изображений, которые можно применять для изучения больших объемов данных [17]. Программное обеспечение имеет решающее значение в настоящее время, поскольку общим узким местом в исследованиях является огромное количество данных, которые могут быть получены с помощью новых технологий. Общей темой является вопрос о том, как эффективно их анализировать. Технологические инновации «Индустрии 4.0» пытаются объединить цифровые, биологические и физических концепции в единых компьютерных системах ИИ. Индустрия 4.0 обещает значительно расширить понимание биологии и революционизировать методы исследования [18]. Счётно-континуальные биологические нечисловые меры высокой размерности будут, по-видимому, обязательным атрибутом метрологии познавательных функций.

2.2. Меры Аллена деления клеток. Методы анализа аналоговых и цифровых изображений при микроскопических исследованиях программами ИИ представляют гигантский объём нечисловых переменных, которые являются компьютерными представлениями нечисловых визуальных мер, помогающими профессионалам изучать живые объекты.

Недавно создана нечисловая мера в Институте клетки Аллена, узнать о которой можно по ссылке [19], и затем модель «Интегрированной митотической стволовой клетки» в пространстве размерности ~ 100. Можно самостоятельно изучать и открывать много-много нового. Вы получите истинное наслаждение от своего открытия ранней прометафазы клеточного цикла вместе с разработчи-

ками этой модели, которую мы предлагаем называть биологической мерой Аллена деления клеток.

3. Пространство познавательных функций

3.1. Когнитивные размерности. Суть биологических измерений познавательных функций состоит, с нашей точки зрения, в применении биологических мер разума к процессу познания. Концепция когнитивных размерностей достаточно естественная. На стыке психологии и программирования предлагаются различные размерности пространства познавательных функций. В работе [20] предлагается фигура знания, которая положена в основу структурирования языкового сознания и задает пять размерностей – функциональную, концептуальную, лексическую, операционную и дискурсивную (гипертекстовая организация) – базы знаний, построенной на материале пассивного режима (от смысла к знаку) работы языкового сознания. Иными словами, метрика языкового сознания складывается из пяти измерений, образуя соответствующее когнитивное пространство размерности $\mathbb{R}^5$.

При создании языков визуального программирования выделяют 4 типа активности с интерактивными объектами: появление нового (создание), транскрипция (переписывание), модификация и исследовательское проектирование. Для каждого из этих действий подходит свой вариант соотношения в каждой из размерностей, которых достаточно много. Основные из них: *градиент абстракции*, *близость соответствия*, *согласованность*, *размытость – сжатость*, *подверженность ошибкам*, *трудность мыслительных операций*, *скрытые зависимости*, *сопоставляемость*, *преждевременная фиксация решения*, *поэтапное оценивание*, *выразительность ролей*, *вторичные обозначения и избегание формализма*, *вязкость программирования*, *наглядность* [21]. Решите задачку о познании одной клеткой другой клетки. Попробуйте на языке этих размерностей представить себе то, как живая клетка «понимает» своё внутреннее состояние, разговаривая на языке органических букв, слов (олигомеров), фраз (полимеров), текстов (надмолекулярных комплексов) и томов (субклеточных органов). В этой задаче ничего не придумано – на этом языке клетки, ткани и органы разговаривают друг с другом! Сравните его с эмерджентными свойствами языковых процессов сознания [22].

Надо различать измерение и размерность, которые являются двумя эквивалентными значениями слова dimension в зависимости от контекста. В знаменитой работе [21] рассмотрена когнитивная размерность (так и назван этот раздел), но конспект результатов работы [21] в Википедии называется «когнитивные измерения».

3.2. Пространства переменных мозга. Суть биологических переменных в том, что они достаточно часто принимают нечисловые значения, некоторые их них перечислены в метафорах раздела 1. Проблема сформулирована просто [23]. Какие паттерны создаются в пространствах клеток мозга человека из запахов, звуков, ощущений тишины и того, что видят глаза? Ответа нет до сих пор, хотя познание различных сторон Природы продолжается с помощью мер из ключевых слов и множества различных образов.

3.3. Меры Института Аллена наук о мозге. В отличие от клеточной меры Аллена две работы из Института наук о мозге опубликованы [24, 25]. Показано, что синхронизация зависит от пространственных структур мезоскопической сети всего мозга [24]. До сих пор мало что известно о пространственной детализации связей всего мозга и ее функциональных последствиях. Чтобы восполнить этот пробел, в статье сделан анализ того, как пространственно ограниченные нейронные связи формируют синхронизацию динамики мозга на основе системы связанных фазовых осцилляторов в сети всего мозга млекопитающих на мезоскопическом уровне. Это стало возможным благодаря недавней разработке атласа связей мозга мыши в Институте Аллена. Атлас построен экспериментально путём отслеживания вирусов, конечно, вместе с новым алгоритмом картирования. Исследована возможность компактного представления сети на основе пространственных зависимостей топологии сети. Обнаружено, что связность имеет значительную пространственную зависимость: пространственно близкие области мозга сильно связаны, а удаленные области слабо связаны, следуя степенному закону. Тем не менее есть ряд участков сильнее степенного соответствия, что указывает на связи между областями мозга, которые связаны сильнее, чем предсказывает степенной закон. При измерении чувствительности параметра сетевого порядка было показано, как эти сильные соединения рассредоточены по нескольким пространственным масштабам сети. Это способствует быстрым переходам между частичной синхронизацией и более глобальной синхронизацией при изменении глобального коэффициента связи. Была продемонстрирована значимость местоположения остаточных соединений [24]. Кроме анатомических и электрических связей, клетки мозга, включая нейроны и астроциты, обмениваются экзосомами, которые переносят внутри себя молекулы сигнальных РНК и белков.

Классификация электрофизиологических и морфологических типов нейронов в зрительной коре мыши получена в работе [25]. Понимание разнообразия типов клеток в мозге требует детальной характеристики отдельных нейронов в нескольких размерностях. Чтобы систематически профилировать морфологические и электрические свойства нейронов млекопитающих, был создан конвейер для записи характеристик отдельных клеток, путём использования стандартизированных записей патч-зажимов в срезах головного мозга и реконструкции нейронов на основе биоцитина. Была создана общедоступная онлайн-база данных «Allen Cell Types Database» для отображения этих наборов данных. Внутренние физиологические свойства были измерены для 1938 нейро-

нов из зрительной коры взрослой лабораторной мыши, морфологические свойства были измерены для 461 реконструированного нейрона, и у 452 нейронов были доступны оба измерения. Была установлена таксономия морфологически и электрофизиологически определенных типов клеток для этой области коры с 17 электрофизиологическими типами, 38 морфологическими типами и 46 морфо-электрическими типами. Наблюдалось хорошее соответствие с ранее определенными типами транскриптомных клеток и подклассами с использованием тех же линий трансгенных мышей [25]. Результаты этой работы представляют собой новую нечисловую меру Аллена для мозга мыши.

3.4. Атлас клеток человека. Этот амбициозный проект с миссией «создать всеобъемлющие справочные карты всех клеток человека – основных единиц жизни – в качестве основы как для понимания здоровья человека, так и для диагностики, мониторинга и лечения заболеваний» начат недавно [26]. Мечта о полном атласе клеток человека старинная, но уже на первых этапах работы возникла проблема нахождения правильных мер для общения специалистов из разных областей знаний.

4. Заключение

Показано, что введение нечисловых мер позволит сделать переход от количественных физических мер к химическим, биологическим, лингвистическим, философским и другим мерам, что позволит говорить на языке биологических и других нечисловых мер каждой конкретной науки. Эти меры сами себя не создадут, хотя необходимость работы со смешанными мерами очевидна. Думается, что биологическая метрология познавательных функций состоится в ближайшее время с помощью нечисловых биологических мер.

Литература

1. The Routledge Handbook of Emergence. Ed by *Gibb S., Hendry R., Lancaster T.* Taylor & Francis Group, 2019. 420 p.

2. *Noble D.* The music of life: biology beyond genome. Oxford University Press, 2006. 168 p.

3. *Noble D.* Dance to the Tune of Life: Biological Relativity. Cambridge University Press. 2016. 302 p.

4. *Белобров П.И.* Принципы биологии клетки в теоретической биофизике // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2017. Т. 2, № 1. С. 159–163.

5. *Kolmogorov A.N.* Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung // Ergebnisse der Mathematik, 1933. V. 2, № 3. P. 1–62; *Колмогоров А.Н.* Основные понятия теории вероятностей. М. : Наука, 1974. 120 с.

6. *Колмогоров А.Н.* Три подхода к определению понятия «количество информации» // Проблемы передачи информации. 1965. Т. 1, № 1. С. 3–11.

7. *Антомонов Ю.Г., Белобров П.И.* Энтропия живых систем // Энциклопедия кибернетики. 1974. Т. 2. С. 585.

8. *Яхно В.Г., Горбунов Д.В., Булатов И.Б., Горбунов С.В.* Термодинамика неравновесных систем И.Р. Пригожина в оценке параметров электромиограмм // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2018. № 1. С. 71–79.

9. *Rao M.M.* Conditional measures and operators // Journal of Multivariate Analysis.1975. 5 (3), 330–413.

10. *Rao M.M.* Conditional Measures and Applications. 2nd ed. Taylor & Francis Group. 2005. 506 p.

11. *Ramer A.* Conditional possibility measures // Cybernetics and Systems. 1989. V. 20, № 3. P. 233–247.

12. *Fukumizu K., Gretton A., Kiyavash N.* Kernel measures of conditional dependence // Advances in neural information processing systems. 2008. P. 489–496.

13. *Kim I.* Comparing a Large Number of Multivariate Distributions : Preprint arXiv: 1904.05741. 2019.

14. *Etesami J., Zhang K. et al.* New Measure of Conditional Dependence : Preprint arXiv: 1704.00607. 2017.

15. *Белобров П.И.* Физические модели надмолекулярной самоорганизации : дис. … д.ф.-м.н. Красноярск, 1996. 298 с.

16. *Birkhoff G.* Mathematics and psychology // SIAM Review. 1969. V. 11, № 4. P. 429–469. Перевод: *Биркгофф Г.* Математика и психология. М. : Сов. радио, 1977. 96 с.

17. *Bates K., Jiang S.* [*et al.*] Fast, versatile and quantitative annotation of complex images // BioTechniques. 2019. V. 66, № 6. P. 269–275.

18. *Lake F.* From Industry 4.0 to Lab 4.0 (From the editor) // BioTechniques. 2019. V. 66, № 6. P. 247.

19. The integrated mitotic stem cell in Allen Cell Explorer // URL https://imsc.allencell.org/ Allen Institute for Cell Science.

20. *Караулов Ю.Н.* Когнитивные размерности языкового сознания // Славистика: синхрония и диахрония. М. : Азбуковник, 2006. С. 14–29.

21. *Green T.R.G., Petre M.* Usability analysis of visual programming environments: a ‘cognitive dimensions’ framework // Journal of Visual Languages & Computing. 1996. V. 7, № 2. P. 131–174.

22. *Барышников П.Н.* Эмерджентные свойства языковых процессов сознания // Вестник Томского гос. университета. 2016. Т. 2, № 34. С. 21–31.

23. *Walter W.G.* The living brain. Penguin, 1961. 258 p. / Перевод: *Уолтер Г.* Живой мозг. М. : Мир, 1966. 302 с.

24. *Choi H., Mihalas S.* Synchronization dependent on spatial structures of a mesoscopic whole-brain network // PLoS computational biology. 2019. V. 15. №4. P. e1006978.

25. *Gouwens N.W., Sorensen S.A. et al.* Classification of electrophysiological and morphological neuron types in the mouse visual cortex // Nature neuroscience. 2019. V. 22. P. 1182–1195.

26. Human Cell Atlas https://www.humancellatlas.org/; The HCA Consortium White Paper 18 Oct 2017; *Regev A. et al.* The human cell atlas: from vision to reality // Nature. 2017. V. 550, № 7677. P. 451–453.

Пространственные особенности нелинейных процессов в коре головного мозга человека

А.Т. Бондарь[1], А.И. Федотчев[1], С.А. Полевая[2]

[1]Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Московская область
[2]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Одним из основных свойств окружающего нас физического мира является его нелинейность. «*В какой бы области естествознания ни возникала нелинейность явлений, она глубоко «функциональна». ...В биологии нелинейность исполнена высокого эволюционного смысла: только сильная нелинейность позволяет биологическим системам «...услышать шорох подползающей змеи и не ослепнуть при близкой вспышке молнии. Те биологические системы, которые не смогли охватить громадный диапазон жизненно значимых воздействий среды, попросту вымерли, не выдержав борьбы за существование. На их могилах можно было бы написать: "Они были слишком линейными для этого мира" (А.М. Молчанов)*»[1].

Механизмы мозга в процессе эволюции, так или иначе, должны были использовать это фундаментальное свойство мира. В литературе накопилось значительное количество данных о роли нелинейности в восприятии звука, ориентации в пространстве, а также в вычислительных операциях нервной системы [2, 3]. В зрительной системе при восприятии ритмических сигналов нелинейность, измеряемая коэффициентом нелинейных искажений (КГИ), может принимать значения сотен процентов [4]. Более того, показано, что гармоники, образующиеся в результате нелинейности, амплитудно и фазово независимы друг от друга [4], что они не просто связаны с искажением формы воспринимаемого сигнала, а имеют какое-то функциональное значение. Несмотря на обилие данных о нелинейных реакциях мозговых структур на внешние ритмические сигналы, свойства и возможная роль этих феноменов в переработке и кодировании сенсорной информации все еще остаются неясными.

В данной работе будут исследованы пространственные свойства нелинейности в коре головного мозга при фотостимуляции синусоидальными сигналами.

В экспериментах в качестве испытуемых принимали участие 8 человек в возрасте от 23 до 35 лет. Электроды, размещённые по стандартной схеме «10–20», регистрировали ЭЭГ в следующих зонах коры: Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2. Фотостимуляцию осуществляли синусоидальными сигналами с фиксированными частотами 6 и 9 Гц. Эксперименты состояли из двух 120-секундных блоков, разделённых 2-минутными интервалами. В первом блоке осуществлялась бинокулярная стимуляция частотой 9 Гц, во втором – бинокулярная частотой 6 Гц.

Для количественной оценки нелинейности использовали коэффициент нелинейных искажений (КГИ), характеризующий степень отличия сигнала от синусоидального:

$$КГИ = \frac{\sqrt{U_2^2+U_3^2+U_4^2+...+U_n^2}}{U_1},$$

где U_n – амплитуда n-й гармоники, а U_1 – амплитуда 1-й гармоники. Поскольку КГИ безразмерная величина, то её принято умножать на 100 % для получения величины выраженной в процентах.

В отличие от электронных и электротехнических систем КГИ в структурах мозга представляет собой нестационарный процесс, демонстрируя значительные колебания во времени. Так, в структурах лимбической системы он может достигать сотен процентов [4]. Превышение КГИ 100 % возможно только тогда, когда общая мощность второй и последующих гармоник превышает мощность первой гармоники, т. е. большая часть энергии вызванного ответа сконцентрирована в высших гармониках. Большой КГИ вряд ли означает несовершенство зрительного анализатора. Ранее нами была выдвинута гипотеза о функциональной роли гармоник при восприятии внешних сигналов [4]. Для её подтверждения были исследованы амплитудные и фазовые соотношения гармоник в вызванных реакциях локальных полевых сигналов в структурах лимбической системы.

Было выявлено полное отсутствие корреляций между амплитудами и фазами наблюдаемых гармоник, что рассматривалось нами как аргумент в пользу выдвинутой гипотезы. В данной работе реакция в коре на стимуляцию синусоидальными сигналами также имела крайне нелинейный характер, проявляющийся в наличии в спектрах ответов множества гармоник (рис. 1), что обусловило очень высокие КГИ во всех отведениях.

Проявление гармоник в различных отведениях неодинаково, т. е. нелинейность имеет пространственные особенности. Так, например, у конкретного испытуемого КГИ в зависимости от отведения варьировала от 93 до 142 % для 9-герцовой стимуляции и от 124 до 222 % при 6-герцовой стимуляции. Для исследования пространственных особенностей КГИ осуществлялось его картирование по коре. Картирование показало наличие хорошо очерченных локусов минимальных и максимальных значений КГИ (рис. 2).

Минимальные локусы соответствуют относительному доминированию в спектре 1-й гармоники, в то время как максимальные – доминированию гармоник более высокого порядка. Минимальные локусы будем считать условно линейными зонами коры, в то время как максимальные – нелинейными. Нелинейные локусы можно рас-

сматривать как ассоциативные, поскольку в них присутствуют все гармоники. Для исследованных частот линейные локусы в пространстве совпадают, в то время как для нелинейных они значительно различаются.

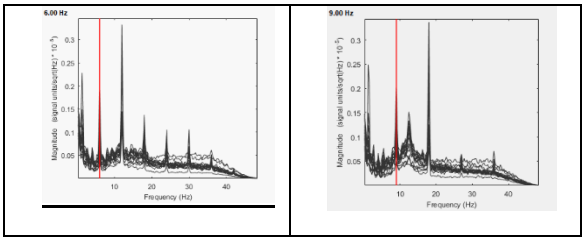


Рис. 1. Спектры ЭЭГ при стимуляции 6- и 9-герцовым синусоидальным сигналом

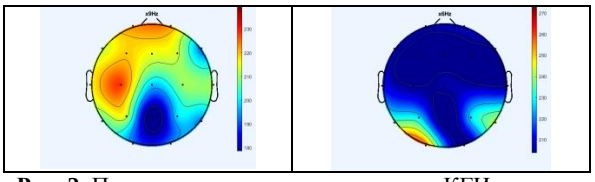


Рис. 2. Пространственное распределение КГИ по коре

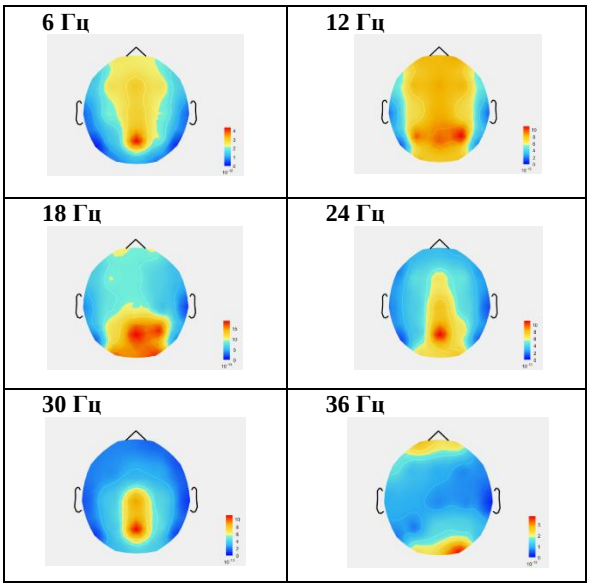


Рис. 3. Пространственное распределение гармоник при стимуляции 6-герцовым стимулом

Поскольку КГИ имеет пространственную структуру, можно полагать, что он обусловлен пространственной дифференциацией гармоник по коре. Действительно, на рис. 3 и 4 видно, что каждая гармоника имеет свою пространственную локализацию, т. е. имеет свой локус с максимально выраженной амплитудой. Это означает, что области коры обладают частотно-специфическими свойствами, максимально реагируя только на определённые частоты, что делает их своеобразным анализатором частот.

Нелинейность следует рассматривать не как простое искажение сигнала, а как механизм формирования независимых гармонических процессов, участвующих в функционировании мозга [4].

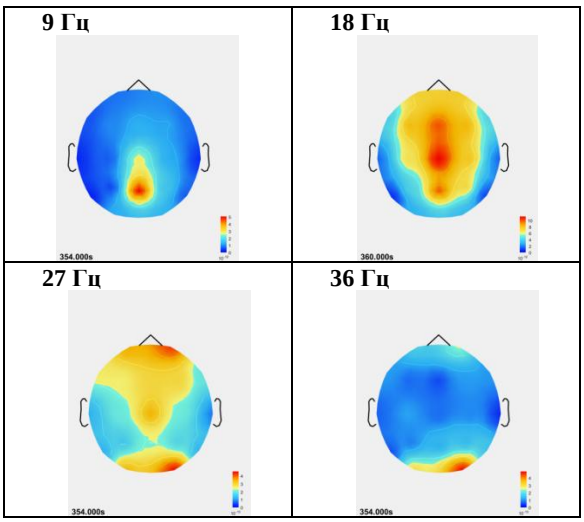


Рис. 4. Пространственное распределение гармоник при стимуляции 9-герцовым стимулом

В настоящее время осцилляции считаются ключевыми игроками в обработке информации в мозге [5, 6].

Однако гармонические процессы не эффективны в качестве носителей информации, так как они описываются только тремя параметрами: частотой, амплитудой и фазой. Для преобразования гармонического процесса в носитель информации он должен быть модулированным, т. е. искаженным, что приведет к появлению дополнительных спектральных составляющих или гармоник. Именно этот механизм лежит в основе теории связи, где синусоидальный сигнал (носитель информации) является амплитудно- или фазомодулированным. Чем больше гармоник содержит искаженный сигнал, тем больше информации он может передавать. Биологический смысл нелинейности, таким образом, может заключаться в превращении периодических процессов в переносчики информации, увеличивая их информационную емкость за счет искажений.

Литература

1. *Данилов Ю.А.* Лекции по нелинейной динамике. Элементарное введение. М. : КомКнига, 2006. 208 с.
2. *Gabbiani F., Krapp H.G., Koch Ch. & Laurent G.* Multiplicative computation in a visual neuron sensitive to looming // Nature. 2002. Vol. 420. P. 320–324.
3. *Silver R.A.* Neuronal arithmetic // Nat. Rev. Neurosci. 2010. 11. P. 474–489.
4. *Bondar A. and Shubina L.* Nonlinear reactions of limbic structure electrical activity in response to rhythmical photostimulation in guinea pigs // Brain Research Bulletin 2018. 143. P. 73–82.
5. *Buzsáki, G.* Rhythms of the Brain. Oxford University Press, 2006.
6. *Vinogradova O.S.*, Hippocampus as comparator: role of the two input and two output systems of the hippocampus in selection and registration of information. // Hippocampus. 2001. 11. P. 578–598.

Диагностика направленных связей между медленными колебаниями потенциалов головного мозга и процессом дыхания

Е.И. Боровкова, А.С. Караваев, Б.П. Безручко

Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского
Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Исследование взаимодействия медленных колебаний электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и сигналов контуров автономной регуляции процесса вариабельности сердечного ритма, имеющих характерную частоту около 0,1 Гц, является важным с фундаментальной и прикладной точек зрения [1–9].

В работах [10–12] было проведено исследование синхронизации медленных колебаний ЭЭГ, процесса дыхания и сигналов контуров автономной регуляции процесса вариабельности сердечного ритма у бодрствующих здоровых людей в ходе специальных активных экспериментов. В этих исследованиях частота дыхания здоровых субъектов изменялась по заданному закону. Постановка активного эксперимента в комбинации с применением методов анализа фазовой динамики позволили обнаружить захват частот и фаз медленных колебаний ЭЭГ дыханием, выявить признаки наличия в разных областях головного мозга нескольких автоколебательных структур, участвующих в формировании медленных колебаний ЭЭГ.

В работе [13] был проведен анализ функции когерентности исследуемых процессов.

Следующим шагом является исследование структуры направленных связей между дыханием, медленными колебаниями ЭЭГ и элементами вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы.

Целью данного исследования являлась разработка методики диагностики направленных связей между процессом дыхания, медленных колебаний ЭЭГ и вариабельностью сердечного ритма (ВСР), имеющими характерную частоту около 0,1 Гц, у бодрствующих здоровых людей в покое при спонтанном дыхании с помощью чувствительных нелинейных методов анализа фазовой динамики исследуемых систем. В исследовании принимали участие трое испытуемых, у которых одновременно регистрировались сигналы неинвазивной скальповой ЭЭГ, электрокардиограммы (ЭКГ) и дыхания при спонтанном дыхании. Длительность регистрации составляла 30 минут.

Для неинвазивной регистрации 19 отведений ЭЭГ использовалась стандартная схема «10–20». Одновременно с каналами ЭЭГ осуществлялась регистрация I стандартного отведения ЭКГ, а также сигнал дыхания абдоминальным тензорезисторным датчиком. Регистрация осуществлялась стандартным сертифицированным прибором Encephalan–EEGR–19/26 (Медиком MTD, Russia) с разрядностью квантования 16 бит, частотой дискретизации 250 выборок в секунду на канал. Полоса пропускания для каналов ЭЭГ составляла 0,0016–80 Гц, для канала ЭКГ – 0,003–80 Гц, для сигнала дыхания – 0,003–80 Гц.

Для повышения достоверности результатов анализа одновременно использовали несколько методов диагностики связи.

В первую очередь, связь диагностировали с помощью оценки коэффициента фазовой когерентности ρ [14].

Во-вторых, рассчитывалась функция когерентности $C(f)$, характеризующая связь спектральных составляющих анализируемых сигналов с помощью оценки кросс-спектра [15].

В-третьих, по экспериментальным данным проводился анализ направленных связей методом моделирования фазовой динамики [16]. Оценивались интенсивности воздействия второй системы на первую $\hat{G}_1$ и первой на вторую $\hat{G}_2$ и аналитический 95-процентный доверительный интервал, как в работе [17]. Чтобы установить факт наличия связи, проверялось отличие оценок «силы» связи $\hat{G}_1$ и $\hat{G}_2$ вместе с 95-процентным доверительным интервалом от нуля. Расчет проводился при значении временного сдвига между рядами $\tau = 10$ с и пробных значениях запаздывания $\Delta_{j\to k}$ 0–20 с.

Дополнительно при расчете всех индексов проводился контроль статистической значимости с помощью генерации ансамбля AAFT суррогатных данных [18]. Результаты полагались значимыми при превышении индексами критического уровня значимости $p = 0{,}05$.

Для всех испытуемых был проведен анализ связи между процессом дыхания, медленными колебаниями ЭЭГ и ВСР с помощью описанных выше методов. Связь между колебаниями отведений ЭЭГ и ВСР анализировалась в полосе [0,04–0,15] Гц, характеризующей так называемый низкочастотный (Low Frequency - LF) диапазон [19]. Связь между колебаниями отведений ЭЭГ и дыханием анализировалась в полосе 0,15–0,4 Гц, характеризующей так называемый высокочастотный (High Frequency - HF) диапазон [19].

Оказалось, что в типичном случае не удается выявить ни одного статистически значимого значения коэффициента ρ колебаний отведений ЭЭГ в LF- и HF-диапазонах. Для отведений ЭЭГ и сигнала дыхания в HF-диапазоне среднее и стандартное отклонение коэффициента ρ по статистике

всех испытуемых и отведений составляет 0,14±0,08, для отведений ЭЭГ и ВСР в LF-диапазоне – 0,16±0,07. Связь между ВСР и дыханием в LF-диапазоне составляет 0,18±0,12, в HF-диапазоне 0,16±0,02.

Функция когерентности $C(f)$ значимо возрастает и статистически значима на частотах около 0,1 Гц при анализе когерентности ВСР и ряда отведений ЭЭГ (рис. 1, *a*), невысока и наблюдаются на грани уровня значимости при анализе ЭЭГ с процессом дыхания на частотах спонтанного дыхания (около 0.3 Гц) (рис. 1, *b*).

Для отведений ЭЭГ и сигнала дыхания в HF-диапазоне среднее и стандартное отклонение $C(f)$ по статистике всех испытуемых и отведений составляет 0,59±0,05, для отведений ЭЭГ и ВСР в LF-диапазоне – 0,62±0,08. Оценка $C(f)$ между ВСР и дыханием в LF-диапазоне составляет 0,90±0,04, в HF-диапазоне 0,16±0,02.

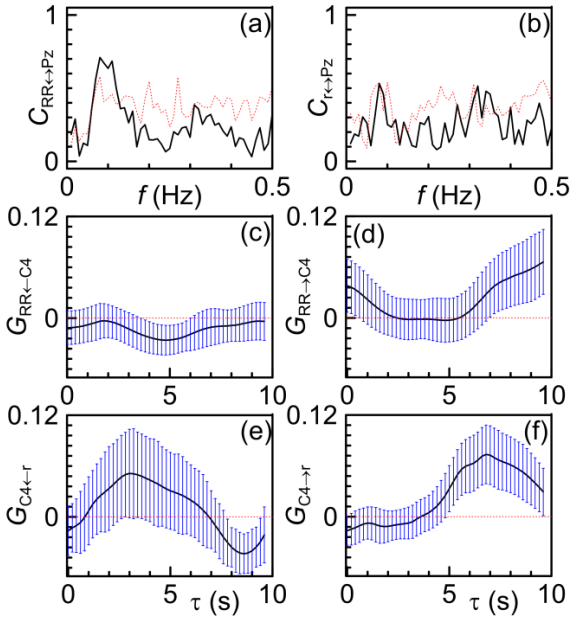


Рис. 1. Анализ взаимодействия отведений ЭЭГ, сигнала вариабельности ритма сердца и дыхания при спонтанном дыхании испытуемого #9. Функция когерентности отведения Pz ЭЭГ и (*a*) - ВСР, (*b*) – дыхания. Сплошная линия – значение функции когерентности. Пунктирная линия - 95% уровень значимости. Результаты диагностики направленной связи на основе моделирования фазовой динамики отведения C4 ЭЭГ и (*c, d*) – ВСР, (*e, f*) – дыхания. Сплошная линия – величина коэффициента *G*. Отклонения отмечают 95% доверительный интервал отличия *G* от 0, рассчитанный с помощью аналитической формулы. Стрелками в нижнем индексе *G* на оси ординат отмечено тестируемое направление связи. Нулевое значение *G* отмечено горизонтальной точечной линией. На оси абсцисс отложена тестируемая величина лага между сигналами.

Количественный анализ максимальных значений функции когерентности указывает, что процессы регуляции с частотами около 0,1 Гц в ЭЭГ и ВСР и процессы ЭЭГ и спонтанного дыхания с характерными частотами порядка 0,3 Гц демонстрирует высокую когерентность, что затрудняет интерпретацию результатов и определения направления связи, так как аналитическая формула для оценки доверительного интервала при сильной связи не работает [16, 17]. Поэтому диагностика направленных связей сопровождалась контролем статистической значимости с помощью генерации ансамбля AAFT (Amplitude Adjusted Fourier Transform) суррогатных данных.

Диагностика направленных связей позволила выявить значимое взаимодействие медленных колебаний ЭЭГ с ритмами ВСР в LF-диапазоне, который связывают преимущественно с симпатической регуляцией кровообращения [19]. При этом воздействие от ВСР к ЭЭГ (рис. 1, *d*) наиболее выражено, чем воздействие от ЭЭГ к ВСР (рис. 1, *c*).

Воздействие дыхания на медленные колебания ЭЭГ в HF-диапазоне, который связывают преимущественно с парасимпатической регуляцией кровообращения, обычно незначимо (рис. 1, *e*). Для большинства отведений удается выявить выраженное значимое воздействие медленных колебаний ЭЭГ на процесс дыхания (рис. 1, *f*).

Взаимодействие составляющих ВСР с дыханием в характерном для дыхания HF-частотном диапазоне достаточно сильное. При этом наиболее выражено воздействие от дыхания к ВСР в частотном LF-диапазоне.

Выявленные запаздывания в связи порядка нескольких секунд (рис. 1, *d, f*) могут указывать на сложный характер взаимодействия изучаемых процессов медленных колебаний ЭЭГ и ВСР с дыханием, включающий временные запаздывания в связях.

В результате развита методика диагностики направленных связей между процессом дыхания, медленными колебаниями ЭЭГ и ВСР. Методика апробирована в ходе анализа записей трех здоровых бодрствующих испытуемых при спонтанном дыхании у здоровых людей. Анализ направленных связей при спонтанном дыхании позволил уточнить преимущественные направления связей и предложить структурную схему взаимодействия процесса дыхания, медленных колебаний ЭЭГ и систем регуляции кровообращения, активность которых проявляется в сигнале ВСР. Наиболее выражено воздействие со стороны дыхания на низкочастотные составляющие ВСР, воздействие со стороны ВСР на низкочастотные составляющие медленных колебаний ЭЭГ, воздействие низкочастотных составляющих медленных колебаний ЭЭГ на процесс дыхания. Результаты свидетельствуют в пользу того, что взаимодействие рассматриваемых процессов носит нелинейный характер и организовано через сложную структуру связей, включающих существенные временные запаздывания порядка нескольких секунд.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда №19-12-00201.

Литература

1. *Aladjalova N.A.* Psychophysiological aspects infraslow rhythmic brain activity. M. : Nauka, 1979. 214 p.

2. *Lorincz M.L., Geall F., Bao Y., Crunelli V., Hughes S.W.* ATP-Dependent Infra-Slow (<0.1 Hz)

Oscillations in Thalamic Networks // PLoS ONE. 2009. V. 4, iss. 2. P. e4447.

3. *Knyazev G.G.* EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes // Neuroscience and Biobehavioral Reviews. 2012. V. 36, iss. 1. P. 677–695.

4. *Vandenhouten R., Lambertz M., Langhorst P., Grebe R.* Nonstationary time-series analysis applied to investigation of brainstem system dynamics // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2000. V. 47, iss. 6. P. 729–737.

5. *Gloor P., Ball G., Schaul N.* Brain lesions that produce delta waves in the EEG // Neurology. 1977. V. 27, iss. 4. P. 326–333.

6. *Accolla E.A., Kaplan P.W., Maeder-Ingvar M.* Clinical correlates of frontal intermittent rhythmic delta activity (FIRDA) // Clinical Neurophysiology. 2011. V. 122, iss. 1. P. 27–31.

7. *Spironelli C., Angrilli A.* EEG delta band as a marker of brain damage in aphasic patients after recovery of language // Neuropsychologia. 2009. V. 47, iss. 4. P. 988–994.

8. *Feddersen B., Ausserer H., Neupane P.* Right temporal cerebral dysfunction heralds symptoms of acute mountain sickness // Journal of Neurology. 2007. V. 254, iss. 3. P. 359–363.

9. *Stuart W.H., Magor L.L., Parri H.R., Crunelli V.* Infra-slow (<0.1 Hz) oscillations in thalamic relay nuclei: basic mechanisms and significance to health and disease states // Progress in Brain Research. 2011. V. 193. P. 145–162.

10. *Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Gridnev V.I., Bodrov M.B., Bespyatov A.B.* Synchronization between main rhythmic processes in the human cardiovascular system // Physical Review E. 2003. V. 68. № 4. P. 419131–4191310.

11. *Karavaev A.S., Kiselev A.R., Runnova A.E., Zhuravlev M.O., Borovkova E.I., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Pchelintseva S.V., Efremova T.Yu., Koronovskii A.A., Hramov A.E.* Synchronization of infra-slow oscillations of brain potentials with respiration // CHAOS. 2018. Vol. 28. P. 081102.

12. *Караваев А.С., Руннова А.Е., Боровкова Е.И., Ишбулатов Ю.М., Хорев В.С., Киселев А.Р., Журавлев М.О., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Безручко Б.П., Короновский А.А.* Синхронизация колебаний низкочастотных составляющих электроэнцефалограмм дыханием с изменяющейся во времени частотой // Саратовский научно-медицинский журнал. 2016. Т. 12, № 4. С. 541–548.

13. *Karavaev A.S., Kiselev A.R., Runova A.E., Koronovskii A.A.* Coherence of low-frequency oscillations of electroencephalogram and the process of autonomous regulation of heart rhythm // The Second School for Young Scientists «Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics», 2018. P. 127–129.

14. *Mormann F., Lehnertz K., David P., Elger C.E.* Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients // Physica D. 2000. V. 144, iss. 3-4. P. 358–369.

15. *Bendat J.S., Piersol A.G.* Random data: analysis and measurement procedures. Indianapolis: Wiley, 2000.

16. *Rosenblum M.G., Pikovsky A.S.* Detecting direction of coupling in interacting oscillatorsDetecting direction of coupling in interacting oscillators // Phys. Rev. E. 2001. V. 64. P. 045202.

17. *Smirnov D.A., Bezruchko B.P.* Estimation of interaction strength and direction from short and noisy time series // Phys. Rev. E. 2003. V. 68. P. 046209.

18. *Schreiber T., Schmitz A.* Improved Surrogate Data for Nonlinearity Tests // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77, № 4. P. 635–638.

19. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology // Circulation. 1996. V. 93. P. 1043–1065.

Принципиальный подход к практически вечному сохранению знаний на основе технологии прямого наложения знаний

Г.Б. Бронфельд, Д.И. Киров

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева;
email: stolem1985@gmail.com, tmdagger2000@gmail.com

Введение

Задача сохранения информации и знаний стояла перед людьми всегда, хотя подавляющему большинству членов общества она всегда была мало видна. Если мы не сможем обеспечить долгосрочное существование, аутентичность и целостность наших документов, то виртуальный цикл развития на основе знаний может остановиться или даже обратиться вспять [1–4].

Долгое время тексты писались вручную на отдельных листах и стали определенным образом сшиваться. Книга – одно из важнейших изобретений нашей эры. И вот И. Гуттенберг изобрел книгопечатание, произошел революционный переворот в практике размножения информации [4, 5]. Это предопределило появление на Земле нового типа развития человечества – «эру человека печатной книги» [6]. Последующее изобретение вначале телеграфа, телефона, радио, потом телевидения, ЭВМ резко ускорило развитие человечества и систему коммуникаций внутри него. Это привело к переходу в «эру массовых коммуникаций» [6].

Наступило захлестывание людей новой информацией и знаниями, приводящее к задержке развития. Применение Интернета, информационных систем, различных интеллектуальных систем (ИС) [7] и «облачных» технологий повысило эффективность работы с информацией, но не снизило остроту проблемы работы со знаниями. Параллельно происходит переход с бумажных носителей информации на электронные и уже появился такой носитель, как электронная книга. Однако знания постепенно утрачиваются, и человек постепенно теряет понимание фактов и технологий, которые были известны и использовались, в том числе из-за языковых изменений.

Во весь рост встает проблема интеграции знаний, только на ее основе возможно обеспечить длительность их сохранения и длительность понимания.

Объемы электронной информации уже сегодня значительно превысили объемы информации на аналоговых носителях и продолжают лавинообразно увеличиваться в силу расширения и усложнения коммуникации, повсеместного распространения и использования технических средств, развития способов производства, распространения и хранения цифровой информации. Однако в будущем и мы, и наши потомки вместо целостной картины прошлого рискуем получить неупорядоченный, лоскутный набор информационных ресурсов, не всегда значимых для понимания прошлого и обеспечения преемственности культурного наследия. Вот почему целый ряд известных мировых деятелей называют наступающее время «темным информационным веком», описывая его в терминах «цифровой альцгеймер, цифровая амнезия» и т. д. [1, 2].

Но пока многими считается ключевой разработка носителей информации, обеспечивающих ее длительное сохранение [8–10]. Стали уже искать носители информации на основе ДНК, которые могут весьма долго сохранять информацию [11]. Но остается проблема, а сохранятся ли на момент окончания срока технические средства для считывания информации, структурные/программные средства для считывания хранимого? И главное, сохранятся ли семантические средства для понимания как отдельных элементов, так и всего сохраняемого в целом [1–3, 10]?

Анализ поставленной проблемы

Сразу подчеркнем, что упор делаем именно на знаниях, а не на информации. Отметим важный момент, связанный с этим и рассмотренный в [12, 13].

В законе об информации дано следующее определение: «Информация – сведения (сообщения, данные), независимо от формы их представления». А знание – это нечто, обеспечивающее человеку целенаправленное координированное действие и выживаемость в природной среде [14, 15]. И при выражении его в текстовом виде знание также входит в состав общего понятия информациия, что на математической основе продемонстрировано в [12, 13]. Для человека важно обеспечить сохранность и доступность именно знаний, которые составляют меньшую часть «моря» информации, но ключевую с точки зрения выживаемости людей.

Идею работы над общим полем знаний высказал в XX веке В. Буш. Первым из удачных подходов было применение единых баз знаний (БЗ) для экспертных систем (ЭС) [7]. В единую БЗ сводятся необходимые знания, полученные моделированием интересующих частей из корпуса текстов и от экспертов. Это удается для ограниченного числа задач с ограниченным объемом информации и знаний.

Другой подход – моделирование отдельных текстов моделями знаний, а потом вывод решений на их основе [16]. Быстро выяснилось, что это задача *NP*-сложности с практически бесконечным перебором вариантов, а частичный вывод приводит к слишком приближенным вариантам. Но многие вновь и вновь пытаются улучшать этот подход [16].

В последние годы компанией IBM в рамках реализации проекта «Разумная планета» удалось продвинуться и создать мощную систему Watson с БЗ из 200 миллионов страниц текстовых источников [18]. Однако технология пока очень дорогая и имеет ряд недостатков. В России намечены свои мероприятия по обеспечению сохранности информации и знаний [19–20].

Но есть и совсем другой вариант этого направления работ, названный технологией «прямого наложения знаний» (ТПНЗ) [13, 21–23]. Впервые подобное использовано в виртуальной астрономической обсерватории Д. Греем для обработки численных данных наблюдений за звездным небом [19].

Хорошо известно, что текстам присуще свойство – интертекстуальность, тем более научно-техническим, которые содержат основной массив теоретических и практических знаний [24, 25]. То есть тексты содержат часть других текстов других авторов. В научно-технических текстах их содержание доходит до 90–95%, а то и более. Рассмотрим, как реализуется подход с ТПНЗ с учетом этой особенности текстов.

Технология «прямого наложения знаний»

Промоделируем знания новым способом, поскольку известные, такие как продукционные модели, семантические сети, и другие [7, 23], сложны в применении для поставленной задачи. Известно из лингвистики, что «наиболее существенной чертой предложения является его способность формировать и выражать мысль» [24, 25].

Метод описания знаний моделью, названной молингой, заключается в следующем [13, 23]. Предложения текста представляются кортежем с составлением словарей терминов (включая синонимы), отношений и т. д. Из предложений убирается эмоциональная окраска, они упрощаются с сохранением основных риторических отношений. Оценка достоверности молинг определяется виде факторов уверенности (ФУ), примененных в ЭС MYCIN. Получается БЗ из молинг. За счет идентификаторов при выдаче ответа может даже восстанавливаться близкий к исходному текст.

ТПНЗ представляет собой множественное объединение моделей текстов из молинг:

$$B_z = M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup \ldots \cup M_n = \bigcup_{i=1}^{n} M_i,$$

где M_i – подбазы знаний из молинг отдельных текстов. В результате в объединенной БЗ B_z остаются только разные молинги.

Молинги (с идентификаторами, определяющими их положение в исходном тексте) вводятся в БЗ ИС по порядку ввода исходных текстов. Если ядра молинг одинаковы или семантически одинаковы тому ядру молинги, которая уже находится в БЗ ИС, то в ней делаются пометки (идентификаторы) из какого текста ввод. Повторение знаний, имеющихся в БЗ, может повысить или понизить их достоверность в зависимости от нового ФУ (пометки дублированных знаний в виде набора идентификаторов сохраняются). А то, чего нет, вводится и увеличивает объем БЗ. С каждым новым введенным текстом БЗ ИС представляет собой новую версию, монотонно возрастающую в объеме.

Элинга/АСУЗ/БАНЗ в режиме ТПНЗ и долговременное хранение знаний (информации)

ИС с БЗ на основе ТПНЗ могут иметь следующие варианты: с массовым производством для индивидуального потребителя – интеллектуальная электронная книга, названная – элингой [13, 20–23], в индивидуальном варианте для отдельного предприятия – аналитическая система управления знаниями (АСУЗ) [13, 22, 23] и для использования массовым потребителем в виде библиотеки аналитического накопления знаний (БАНЗ) [13]. Элинги позволят: заносить в них постепенно большое количество знаний; пользователю получать ответ сразу (почти со скоростью расчетных программных средств) без изучения технической литературы, задавая вопросы элинге; приобретать их по низкой стоимости; работать в широкой предметной области; пользователю получать результаты на уровне лучших специалистов мира и выше.

В состав элинги входит программное обеспечение (ПО), реализующее машину вывода, БЗ и сервисные программы. БЗ включает словари терминов, отношений и др. (их эквивалентов), собственно знания, содержащиеся в текстах в виде молинг, расчетные модели (реализованные в виде отдельных подпрограмм, ускоряющих работу), визуальные и графические образы.

Физически элинги представляют собой устройство хранения информации со специальной машиной вывода и БЗ. Одновременно могут создаваться элинги по многим предметным направлениям знаний. Каждые 1–2 квартала будет выходить новая версия элинги определенного направления с новой расширенной версией БЗ. Пока в мире элинги не производятся. В то же время существуют отдаленные аналоги как элинг, так и АСУЗ, например, [26], что свидетельствует о принципиальной реализуемости проекта. А пока постепенно проводятся экспериментальные разработки прототипов элинг и отработка методологии [27].

Для человечества – одна из важнейших проблем: длительное сохранение информации и знаний. Для стандартных видов информации и их носителей проблематика сохранности информации изучена [1, 4, 8–11]. В таблице приведены сроки сохранности информации на разных носителях.

На камне информация сохраняется долго, но малая плотность записи информации и тяжело перевозить. На глиняных табличках тоже долго сохраняется, легче транспортировать, но также малая плотность записи. На бумаге также неплохо сохраняется, неплохо перемещается, но также малая плотность записи, ограниченная эргономикой человека для ее восприятия.

№ п/п	Вид информации	Носитель	Срок сохранности, лет	Условия сохранности	Источник информации
1	Образы	Камень	Десятки тысяч		[4]
2	Текстовая информация	Глиняные таблички	Тысячи	Библиотеки	[4, 8]
3	Текстовая информация	Бумага	Сотни	Библиотеки	[1,4,8]
4	Цифровая информация	Магнитная лента	30–49	Периодическая перезапись	[8–10]
5	Цифровая информация	Магнитные диски	20–30		[8–10]
6	Цифровая информация	Оптические диски	50–100 (улучшенные до 200–300)		[8–10]
7	Цифровая информация	Флэш-память	20–100	Выдерживает меха–нические нагрузки	[8–10]
8	Цифровая информация	Специальный носитель	До 2000		[10]
9	Знания, в т. ч. текстовая информация, графика, образы	Элинга на флэш-памяти	Практически неограниченно	Пока не прекратится перевыпуск	[13, 23–25, 29]

Теперь цифровые машинные носители информации. На первый взгляд, они могут храниться неограниченно долго. Но первое ограничение – сами носители. Казалось бы, 50 лет для магнитных лент много, но с начала использования уже прошло более 60 лет. Первые магнитные диски давно стали технической реликвией. Казалось бы, оптические диски лучше. Но возникают иные проблемы. Основная – это то, что теряется прямой контакт человека с носителями информации и без специального посредника человек не способен прочитать, что написано на них. Стремительная смена поколений компьютеров и версий ПО усложняет или даже делает невозможным использование носителей машинной информации и баз данных из, казалось бы, недавнего времени [1, 2, 8–10]. Чем же тут отличается ситуация с технологией элинги/АСУЗ/БАНЗ, для которой в таблице указан «практически неограниченный» период сохранения знаний.

Рассмотрим по этапам.

Производитель (рис. 1) выбирает печатные источники для ввода в БЗ (этап 1). Затем эксперт-редакторы моделируют тексты молингами (этап 2) и вводят молинги в БЗ (этап 3). Этапы разработки элинг и регулярной доработки ПО опущены, они для данной технологии в отличие от многих других особых проблем не создают [13]. Есть этап 4 доработки на новое ПО или машинный носитель, не стыкуемые с прежними. Затем происходит массовый выпуск элинг на специальном машинном носителе (этап 5). Эксплуатация элинг потребителями (этап 6) вряд ли будет более 1 года (мало кто из людей узнает новости из вчерашних газет и журналов). Постепенно формируется запрос от потребителей на новый вариант элинги с более полной БЗ (этап 0). И далее по «бесконечному» циклу, пока люди не придумают нечто лучшее, чем элинга/АСУЗ/БАНЗ.

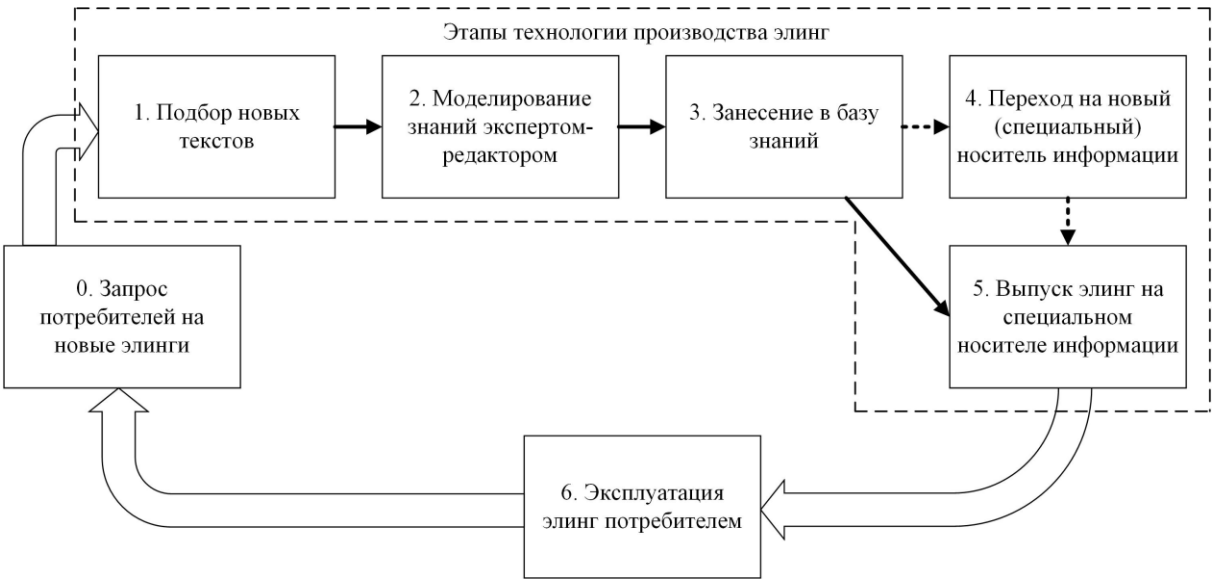


Рис. 1. «Бесконечная» цикловая диаграмма производства и эксплуатации элинг

Элинга/АСУЗ/БАНЗ выступает для потребителя как носитель знаний – локальная библиотека знаний. Итог – решается важная проблема. Со временем меняется сам язык, появляются новые понятия, старые меняются [1–4, 10, 13, 15, 24, 27]. Поэтому плохо воспринимаются многие знания и факты, изложенные в древних текстах. Элинги/АСУЗ/БАНЗ позволят адаптироваться к языковым изменениям и сохранять семантическое содержание устаревшего и стыковать с новыми [13, 24]. Это не противоречит сохранению роли печатных книг, как авторских точек зрения [26, 27].

Заключение

Рассмотренный подход для ИС на основе использования ТПНЗ создает новый и весьма эффективный метод работы со знаниями и попутно обеспечивает новые возможности для решения научно-технических задач и сохранения знаний и частично информации на «практически вечный» период времени. Данная технология внесет важный вклад в решение одних из важнейших современных проблем – проблемы сатурации (перенасыщения информацией) и частично в сохранении цифрового наследия. И конечно, кроме новых БАНЗ, будут сохраняться традиционные библиотеки и их новое развитие для цифровой информации.

Литература

1. *Кузьмин Е.И.* Сохранение информации: прошлое, настоящее, будущее // Сб. матер. междунар. конф. «Сохранение электронной информации в информационном обществе: проблемы и перспективы». М., 2011. С. 28–47.
2. *Лор П.Й.* Этические и политико-экономические аспекты долгосрочного сохранения цифрового наследия // Сб. матер. междунар. конф. «Сохранение электронной информации в информационном обществе: проблемы и перспективы». М., 2011. С. 48–79.
3. Хартия о сохранении цифрового наследия // Библиотековедение, 2004. № 6. С. 40–43.
4. *Немировский Е.Л.* Большая книга о книге. М. : Время, 2010. 1088 с.
5. *Пилко И.С.* Информационные и библиотечные технологии. СПб. : Профессия, 2008. 342 с.
6. *Маклюэн М.* Галактика Гуттенберга. Становление человека печатающего. М. : Академический проект Фонд «Мир», 2005. 496 с.
7. *Гаврилова Т.А. и др.* Инженерия знаний. Модели и методы. СПб. : Лань, 2016. 324 с.
8. *Фрадкин В.Н.* Прошлое, настоящее и будущее носителей информации // Компьютер Price, 2003, № 46. С. 63–67.
9. Длительное хранение информации: как хранить файлы бесконечно. 2016. http://pcyk.ru/program/dlitelnoe-xranenie-informacii/.
10. *Bollacker K.D.* Avoiding a Digital Dark Age // American Scientist, 2010. V. 98, No 2. P. 106–110.
11. *Erlich Y., Zielinski1 D.* DNA Fountain enables a robust and efficient storage architecture // Science, 2017. Vol. 355, Issue 6328. P. 950–954.
12. *Бронфельд Г.Б.* Некоторые возможности формального представления структуры знаний // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 4(97). С. 91–100.
13. *Бронфельд Г.Б.* Прямое наложение знаний и его возможности. Анализ, методология, новая модель знаний, алгоритмы, возможности «невозможности». Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Puplishng, 2014. 236 с.
14. Информационные технологии в бизнесе / под ред. М. Желены. СПб : Питер, 2002. 120 с.
15. *Аверьянов Л.Я.* Контент-анализ. М. : КНОРУС, 2009. 456 с.
16. *Тыугу Э.Х.* Интеграция знаний // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1989. № 5. С. 3–13.
17. *Дулин С.К., Кисилев И.А.* Интеллектуальная система организации многоуровневой согласованной базы знаний // Программные продукты и системы. 2002. № 4. С. 19–22.
18. *Хай Р.* Эпоха когнитивных систем: Принцип построения и работы IBM Watson // IBM. 2013. 15 с. http://www.olap.ru/home.asp?artId=2507
19. Указ Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 – 2030 годы» https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71570570/
20. ГОСТ Р 54989—2012/ISO/TR 18492:2005. Обеспечение долговременной сохранности электронных документов. 23 с.
21. *Gray J., Czalay A.* The World – Wide Telescope, an Archetype for Online Science, 2002. 6 p.
22. *Бронфельд Г.Б.* Прямое наложение знаний на основе моделей специального вида // Системы управления и информационные технологии. 2011. №4.1(46), С. 124–128.
23. *Бронфельд Г.Б.*: Патент на изобретение, № 2440610. Российская Федерация, МПК G06 N 5/00. Система для работы с интеллектуальной электронной книгой – элингой; заявка 21.06.2010; опубл. 20.01.12, Бюл. №2.
24. *Бронфельд Г.Б.* Прямое наложение знаний и «практически вечное» сохранение знаний и информации // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4(101). С. 173–182.
25. *Бронфельд Г.Б.* Основы искусственного интеллекта. Н. Новгород : НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. 253 с.
26. *Лукин В.А.* Художественный текст: Основы лингвистической теории. Аналитический минимум. М. : Издательство «Ось-89», 2009. 560 с.
27. *Диброва Е.И. и др.* Современный русский язык. Теория. Анализ языковых единиц. В 2 частях. М. : Изд. центр «Академия», 2008.
28. IHS Goldfire. Accelerating Decisions. Powering Innovation. White Paper // IHS Inc., 2013. 7 p. https://ihsmarkit.com/pdf/IHS-Goldfire-Platform-Whitepaper_140823110915517432.pdf.
29. *Bronfeld G.B., Kirov D.I., Khnigina A.V.* The prototype of the intelligent e-book – elinga with the knowledge base of molingas// Modern informatization problems in economics and safety (MIP-2019'ES): Proceedings of the XXIV-th International Open Science Conference (Yelm, WA, USA, January 2019)/ Editor in Chief Dr. Sci., Prof. O.Ja. Kravets. Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2019. P. 283–289.

Grand Design когнитивной организации: междисциплинарная одиссея

Б.М. Величковский

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва,
Российский государственный гуманитарный университет, г. Москва,
Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область,
Технический университет Дрездена, Германия

В центре представлений о когнитивной, или, точнее, когнитивно-аффективной организации психики человека находится вопрос о мозговых механизмах рефлексивного сознания, впервые поставленный в работах Декарта. По сегодняшний день сознание остается крупнейшей из пока нерешенных наукой проблем. Более того, все еще распространенным остается мнение, что эта проблема в принципе неразрешима: «*Ignoramus et ignorabimus!*».

В своем докладе я расскажу о цикле междисциплинарных исследований уровневой организации мозга и сознания человека, проведенных под моим руководством в 2016–2019 гг. в Курчатовском НБИКС-центре.

В этих исследованиях на базе применения методов математической физики, нейрофизиологии, генетики, психосемантики и клинической нейропсихологии удалось открыть массивную асимметрию взаимодействий эволюционно различных структур коры головного мозга человека в базовом для сознания состоянии бодрствующего покоя. Благодаря анализу дифференциальной экспрессии белок-кодирующих генов в структурах фронтополярной коры человека в параллельной линии экспериментов были впервые описаны молекулярные аналоги обнаруженной латерализации связей макросетей головного мозга. Нами предложена гипотеза центральной роли правого гиппокампа (как современного варианта органа *sensus communis*) в возникновении подобной асимметрии. Эта гипотеза обоснована наблюдениями за нарушениями поведения у пациентов с травмами головного мозга, а также результатами изучения микроповедения глаз при восприятии сложной зрительной информации, спектрального динамического каузального моделирования (ДКМ) данных функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) и упомянутых выше исследований экспрессии белок-кодирующих генов и микроРНК.

Литература

Велихов, Е.П., Котов, А.А., Лекторский, В.А., Величковский, Б.М. Междисциплинарные исследования сознания: 30 лет спустя // Вопросы философии. 2018. *12*, 5–17; doi: 10.31857/S004287440002578-0.

Velichkovsky, B.M., Krotkova, O.A., Kotov, A.A., Orlov, V.A., Verkhlyutov, V.M., Ushakov, V.L., Sharaev, M.G. Consciousness in a multilevel architecture: Evidence from the right side of the brain // Consciousness and Cognition. 2018. *64*, 227-239. doi: 10.1016/j.concog.2018.06.004.

Velichkovsky, B.M., Sharaev, M.G., Ushakov, V.L. Consciousness in a multilevel architecture: What causes the lateralization of effective connectivity under resting state? *Consciousness and Cognition*. 2019. *73*. doi: 10.1016/j.concog.2019.05.003.

Особенности аффективно-когнитивных регуляторных процессов у матерей, воспитывающих детей с расстройством аутистического спектра

Е.А. Дорошева

Новосибирский государственный университет, elena.dorosheva@mail.ru

Введение

Расстройства аутистического спектра (далее – РАС) представляют собой группу расстройств, характеризующихся тяжелым течением и присутствием специфических нарушений – в сферах межличностного взаимодействия и социального познания, самовосприятия, воображения. Наличие в семье ребенка с РАС является фактором хронического стресса для родителей. Специфика стрессовых воздействий состоит в нарушениях коммуникации, которые становятся ключевым проблемным фактором в детско-родительских отношениях: резко снижена положительная обратная связь от ребенка, его поведение необычно и плохо интерпретируемо и т. д. Родители детей с РАС сталкиваются с необходимостью регуляции собственных эмоциональных состояний. В большей степени это относятся к матерям, которые проводят с детьми значительную часть времени, на них ложится максимальная нагрузка [1].

Показано, что особенности поведения родителей оказывают существенное влияние на благополучие и адаптацию детей с РАС (например, на формирование типа межличностной привязанности) [2]. В то же время тяжесть протекания РАС влияет на психоэмоциональное состояние и адаптацию их родителей [3]. Таким образом, способности родителей к саморегуляции как один из компонентов жизнестойкости могут быть фактором, тесно вписанным в контекст детско-родительских отношений.

Исследование используемых родителями детей с РАС механизмов саморегуляции, с одной стороны, имеет существенную практическую значимость при сопровождении семей, в которых воспитываются дети с РАС, с другой – является интересным с точки зрения создания общей модели саморегуляторных процессов.

Целью нашего исследования явилось изучение аффективно-когнитивных способов регуляции эмоций у матерей, воспитывающих детей с РАС. Дополнительно изучалась взаимосвязь используемых способов регуляции эмоций с самооценкой особенностей эмоциональных взаимодействий с ребенком.

Адаптация русскоязычной версии опросника регуляции эмоций у родителей

На первом этапе исследования нами была проведена адаптация русскоязычной версии опросника регуляции эмоций у родителей Parental Emotion Regulation Inventory 2, PERI2 [4]. При разработке опросника использовался двойной обратный перевод. Опросник содержит 23 пункта, оцениваемых по шкале от 1 – совершенно не согласен до 7 – совершенно согласен. Инструкция содержит вопрос о действиях родителей в проблемных ситуациях, возникающих при взаимодействиях с детьми.

Опросник включает четыре шкалы: когнитивная переоценка ситуаций, связанных с ребенком (придание изначально негативным ситуациям положительного значения); подавление мыслей о негативных ситуациях, связанных с ребенком; капитуляция перед ребенком (потакание его желаниям, чтобы снизить собственное напряжение, даже если это вредно для ребенка) и избегание контакта с ребенком (стремление родителя физически избежать контакта с ребенком в сложной ситуации).

Основная выборка составила 211 родителей, воспитывающих детей в возрасте от рождения до 16 лет (184 женщины, 27 мужчин, возраст 26–48 лет, средний возраст – 36 лет).

Были показаны удовлетворительные психометрические характеристики опросника. Согласованность шкал высокая (альфа Кронбаха составила от 0,78 до 0,84). Описана хорошая конвергентная валидность (родственные конструкты, измеряемые методиками: опросник когнитивной регуляции эмоций, шкала руминаций, опросник подавления мыслей, опросник изучения родительских установок, методика диагностики уровня эмоционального выгорания у матерей, опросник «Преодоление трудных жизненных ситуаций». Факторная структура соответствует оригинальной версии опросника.

Исследование особенностей регуляции эмоций у матерей, воспитывающих детей с РАС

Методы

На втором этапе исследования были сформированы две группы: матерей детей с РАС (27 человек) и матерей, воспитывающих нейротипичных, условно здоровых детей (26 человек), возраст матерей – от 25 до 51 года (средний возраст – 35 лет), возраст детей – от 2 до 11 лет. Группы были выровнены по числу полных и неполных семей. РАС включали: детский аутизм с умеренной умственной отсталостью, аутизм с синдромом Мартина – Белла, синдром Аспергера, ранний детский аутизм, аутизм с умственной отсталостью и синдромом Вильямса, расстройство аутистического спектра, аутизм с эпилепсией, детский аутизм с тугоухостью, высоко-функциональный аутизм с СДВГ, детский аутизм с другими расстройствами поведения.

Для исследования особенности саморегуляции использовали опросник регуляции эмоций у родителей и опросник когнитивной регуляции эмоций в адаптации Е.И. Рассказовой, А.Б. Леоновой, И.В. Плужникова [5]. Дополнительно применяли опросник детско-родительского эмоционального взаимодействия Е.И. Захаровой [6]. Данный опросник фокусируется на измерении эмоционального отношения к ребенку со стороны матери. Опросник заполнялся в основной группе по отношению к ребенку, страдающему РАС; для заполнения опросника в контрольной группе (при ее формировании) к каждому ребенку с РАС подбирался ребенок того же возраста и пола.

Сравнение выраженности стратегий регуляции эмоций в группах матерей детей с РАС и матерей нейротипичных детей проводили с помощью *U*-критерия Манн-Уитни. Взаимосвязь аспектов эмоциональных взаимоотношений с ребенком и стратегий регуляции эмоций в каждой группе выявляли с помощью коэффициента корреляции Спирмена.

Результаты и обсуждение

Когнитивная переоценка ситуаций, связанных с ребенком, и подавление мыслей о нежелательных ситуациях, также связанных с ребенком, более выражены у матерей, воспитывающих детей с РАС (соответственно, $U = 280{,}0$, $p = 0{,}020$; $U = 165{,}0$, $p < 0{,}000$, опросник регуляции эмоций у родителей). Интересно, что уровень когнитивной переоценки по отношению ко всем ситуациям (а не только касающимся взаимодействия с ребенком) значимо не различается в группах исследования. Это может указывать на специфичность применения данной стратегии регуляции эмоций в ситуациях взаимодействия с детьми. (Склонность подавлять мысли о любых неприятных ситуациях в группах не исследовалась, поэтому сделать заключение о специфичности данной стратегии мы не можем).

Регуляция эмоций по отношению к широкому кругу ситуаций значимо отличалась по единственному показателю: для матерей, воспитывающих детей с РАС, в большей степени выражено смирение с отрицательными ситуациями, принятие их как чего-то неизменного, без попыток их преодоления ($U = 226{,}0$, $p < 0{,}027$, опросник когнитивной регуляции эмоций).

Корреляционный анализ не выявил значимых взаимосвязей когнитивной переоценки во взаимодействиях с ребенком с факторами эмоционального отношения к ребенку в группе матерей, воспитывающих детей с РАС. Похоже, что это универсальный способ регуляции эмоций в ситуациях взаимодействия с детьми, вызывающих отрицательные эмоции.

В данной группе были выявлены значимые положительные связи руминаций (понимаемых в данном случае как навязчивые размышления) и общей чувствительности к ребенку ($r = 0{,}60$, $p < 0{,}001$), а также ее компонентам: понимание причин состояния ребенка ($r = 0{,}57$, $p < 0{,}01$) и способность к сопереживанию ребенку ($r = 0{,}37$, $p < 0{,}05$). В группе матерей нейротипичных детей значимых корреляций руминаций с показателями отношения к ребенку не выявлено (группы слишком малочисленны для убедительного статистического сравнения значимости корреляций, однако мы считаем целесообразным привести коэффициенты корреляции для соответствующих показателей: $r = 0{,}23$, $r = 0{,}16$ и $r = 0{,}11$). Таким образом, данный регуляторный механизм (уход от актуальной неприятной ситуации в размышления, внутренние переживания) специфичен для матерей, воспитывающих детей с РАС и имеющих высокую чувствительность к ребенку.

Избегание взаимодействия с ребенком также прямо связано с общей чувствительностью к ребенку ($r = 0{,}58$, $p < 0{,}01$) и с чувствительностью к его переживаниям ($r = 0{,}54$, $p < 0{,}01$). У родителей, воспитывающих нейротипичных детей, данные взаимосвязи не выявлены ($r = 0{,}06$ и $r = 0{,}13$). Капитуляция (потакание) в отношениях с ребенком в обеих группах прямо связана с чувствительностью к переживаниям ребенка ($r = 0{,}50$, $p < 0{,}01$ для матерей детей с РАС и $r = 0{,}48$, $p < 0{,}05$ для матерей нейротипичных детей), а также только для матерей, воспитывающих детей с РАС, с общим принятием ребенка ($r = 0{,}40$, $p < 0{,}05$).

Можно заключить, что обе поведенческие стратегии регуляции – и избегание взаимодействия, и капитуляция перед желаниями ребенка – присущи эмоционально вовлеченным в контакт с ребенком матерям, и это проявляется гораздо ярче в группе матерей, воспитывающих детей с РАС.

Подавление мыслей о ситуациях взаимодействия с детьми, которые вызывают отрицательные эмоции, также имеет значимые взаимосвязи с компонентами отношения к ребенку только в группе матерей детей с РАС. Оно прямо связано с общим эмоциональным принятием ребенка ($r = 0{,}39$, $p < 0{,}05$) и преобладающим эмоциональным фоном во взаимодействии с ребенком ($r = 0{,}47$, $p < 0{,}05$), т. е. матери в контакте с ребенком действительно испытывают более позитивные эмоции, подавляя «нежелательные» мысли. Этот результат неочевиден, так как подавление мыслей, вызывающих отрицательные переживания, по данным многих исследователей ведет к их неконтролируемому возвращению, что после достижения сиюминутного положительного эффекта может снижать настроение в долгосрочной перспективе [7]. В данной группе проявился позитивный эффект этого регуляторного механизма. Однако он касается только моментов контакта с ребенком, неясно, как он сказывается в целом на настроении матери.

Дополнительно мы проверили предположение: не связано ли подавление мыслей с другими регуляторными механизмами. Например, избегая контакта с ребенком, легче подавлять нежелательные мысли. Однако проведенный корреляционный анализ не показал взаимосвязи ни одной пары стратегий регуляции эмоций в ситуациях, связанных с взаимодействиями с ребенком, в группе ма-

терей, воспитывающих детей с РАС. Таким образом, эти регуляторные механизмы, как можно полагать, независимы.

У матерей нейротипичных детей эмоциональное принятие ребенка и эмоциональные проявления в поведении по отношению к ребенку не показали значимых корреляций со стратегиями регуляции эмоций. Общая чувствительность к ребенку прямо связана с единственной стратегией регуляции эмоций – катастрофизацией. Это ожидание преувеличенно негативных последствий отрицательных событий, дающее позитивную эмоциональную разрядку, когда эти последствия не наступают. Похоже, что повышение чувствительности к состояниям ребенка для всех матерей делает ситуации взаимодействия более напряженными, в большей степени требующими регуляции возникающих эмоций, но предпочитаемые способы их регуляции у матерей двух групп различаются. Кроме того, матерям детей с РАС присуще большее напряжение.

Стоит упомянуть и некоторые (немногочисленные) взаимосвязи стратегий эмоциональной регуляции, для которых ранее показана эффективность в долгосрочной перспективе, и особенностей отношения к ребенку. Так, фокусирование на планировании решения проблемных ситуаций в группе матерей нейротипичных детей прямо связано со способностью воспринимать состояние ребенка (r = 0,49, p < 0,01). Эта связь не выявлена для матерей детей с РАС (r = –0,14); возможно, ее отсутствие объясняется тем, что, сталкиваясь с очень существенными проблемами, они зачастую не могут получить их удовлетворительное решение, что препятствует им воспользоваться этим механизмом как ресурсом.

Позитивная перефокусировка, т. е. смещение акцента с отрицательных аспектов проблемной ситуации на другие, более положительные аспекты, именно в группе матерей, воспитывающих детей с РАС, имеет прямые связи с безусловным принятием ребенка (r = 0,47, p < 0,05) и самооценкой своего умения воздействовать на его состояние (r = 0,52, p < 0,01). Вероятно, эта стратегия остается доступной даже для очень серьезных проблемных ситуаций.

Заключение

В целом мы можем заключить, что стратегии эмоциональной регуляции в большей степени применяются матерьми, воспитывающими детей с РАС, чем матерьми нейротипичных детей. Чувствительность к состоянию ребенка, определяемая как проявления внимания к чувствам, мыслям, потребностям, индивидуальности ребенка, описывается как благоприятствующий развитию ребенка с РАС фактор [8]. Измеренная нами самооценка чувствительности к ребенку связана с увеличением представленности некоторых условно неэффективных (в долгосрочной перспективе) стратегий регуляции эмоций. Можно предположить, что для того чтобы оставаться в эмоциональном контакте со «сложным» ребенком, необходимо большее использование саморегуляционных механизмов, а их более высокое развитие частично предоставляет ресурс, который может помочь в решении именно этой задачи (что происходит с благополучием родителя – открытый вопрос). И, по всей видимости, чувствительность к состояниям ребенка не может рассматриваться в отрыве от способности регулировать его состояние: «бессильная» чувствительность скорее явится фактором дезадаптации, тогда как сочетание понимания, чувствования ребенка и возможности использовать это для более эффективного общения с ним – фактор благополучия матери и ребенка.

Важно подчеркнуть неравноценность имеющихся механизмов регуляции эмоций для решения данной задачи. Так, избегание контакта с ребенком, которое прямо связано с большей чувствительностью к ребенку, относится к защитным проявлениям и не может быть рассмотрено как ресурс (эмоционально чувствительная мать в сложной ситуации менее способна оставаться в контакте с ребенком).

Подавление негативных мыслей связано с поддержанием хорошего настроения матери в контакте с ребенком и не связано, по нашим данным, со стратегией избегания, т. е., возможно, служит некоторым ресурсом для матери. В то же время мы не можем исключить и того, что более позитивный контакт матери и ребенка – отдельный феномен, не отражающий благополучия матери, но указывающий на ее старания организовать именно такой контакт.

В целом, можно предполагать, что в ситуации наличия в семье ребенка с РАС действительно актуализируется совокупность механизмов саморегуляции, тесно связанная, прежде всего, с характером эмоционального взаимодействия с ребенком. Ранее сделана попытка выявить «сквозные» феномены, всегда характерные для РАС, лежащие в основе формирования широкого спектра их симптомов; такие как нарушения самовосприятия [9], интолерантность к неопределенности [10]. К таким феноменам, с нашей точки зрения, могут относиться и особенности эмоционального контакта матери и ребенка, формирующиеся в раннем возрасте, задающие направление коммуникативного развития ребенка и избирательно страдающие при РАС. Это подчеркивает необходимость дальнейшего изучения как собственно особенностей эмоциональных контактов детей с РАС и их матерей, так и системы саморегуляционных механизмов матерей, связанных с эмоциональными взаимодействиями с ребенком.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-013-00715).

Литература

1. *Никольская О.С., Баенская Е.Р., Либлинг М.М.* Аутичный ребенок. Пути помощи. М. : Теревинф, 1997.

2. *Oppenheim D., Koren-Karie N., Dolev S., Yirmiya N.* Maternal insightfulness and resolution of the diagnosis are associated with secure attachment in preschoolers with autism spectrum disorders // Child Development. 2009. Vol. 80, № 2. P. 519–527.

3. *Дорошева Е.А., Грабельникова У.С.* Синдром эмоционального выгорания, особенности совпадающего поведения и регуляции эмоций у матерей, воспитывающих ребенка с расстройством аутистического спектра // Reflexio. 2018. № 1. С. 5–18.

4. *Lorber M., Del Vecchio T., Feder M.* A Psychometric Evaluation of the Revised Parental Emotion Regulation Inventory // Journal of Child and Family Studies. 2017. № 26. P. 452–463.

5. *Рассказова Е.И., Леонова А.Б., Плужников И.В.* Разработка русскоязычной версии опросника когнитивной регуляции эмоций // Вестник МГУ. Сер. Психология. 2011. № 4. С.161–179.

6. *Захарова Е.И.* Особенности мотивационной сферы матерей с детьми младенческого, раннего и дошкольного возраста // Вестник МГУ. Серия Психология, 2011. № 2. С. 97–110.

7. *Wegner D.M., Zanakos S.* Chronic Thought suppression// Journal of Personality, 1994. № 62. P. 615–640.

8. *Koren-Karie N., Oppenheim D., Dolev S., Yirmiya N.* Mothers of securely attached children with autism spectrum disorder are more sensitive than mothers of insecurely attached children // Journal of Child Psychology and Psychiatry. 2013. P. 643–650.

9. *Первушина О.Н., Хорошилов Б.М.* О роли самовосприятия в когнитивном и социальном функционировании аутистов // Современные проблемы клинической психологии и психологии личности. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Новосибирск : Изд-во НГУ, 2018. С. 104–108.

10. *Первушина О.Н.* Аутизм через призму отношения к неопределенности // Восьмая международная конференция по когнитивной науке. Светлогорск, 2018. С. 803–805.

Стратегии эмоциональной регуляции в структуре эмоционального интеллекта

Е.А. Дорошева

Новосибирский государственный университет, email: elena.dorosheva@mail.ru

Реакции на эмоциогенные стимулы являются результатом развертывания ряда аффективных и когнитивных процессов, направленных на целостную оценку стимула, внешней ситуации и внутреннего состояния.

Одной из их составляющих может являться саморегуляция своего эмоционального состояния, осуществляемая как на бессознательном, так и на сознательном уровне. Возможность управления своими эмоциями издавна интересовала людей, разрабатывались способы, позволяющие научиться этому. Идея о возможности понимания эмоций и управления ими, как собственными, так и эмоциями других людей, легла в основу концепции эмоционального интеллекта [1].

Позже в фокусе исследований оказались конкретные стратегии, с помощью которых происходит регуляция эмоций. Так, широкое распространение получила модель регуляции эмоций Дж. Гросса, описывающая разворачивание регуляторных стратегий во времени относительно возникновения эмоциогенной ситуации и выделяющая ряд конкретных регуляторных стратегий [2].

Среди них описаны как условно эффективные, т. е. прямо связанные с субъективным благополучием личности, и условно неэффективные – связанные обратно. Условно, поскольку в зависимости от конкретной ситуации эффективность стратегии меняется [3]. Кроме того, похоже, что часть стратегий дает положительные текущий и отсроченный эффекты, тогда как другие дают сиюминутный эффект, негативно сказываясь в будущем (например, подавление неприятных мыслей, приводящее к тому, что в дальнейшем они спонтанно всплывают и усиливаются) [4].

Представления о разной эффективности стратегий, которые регулируют эмоциональный ответ, ставят вопрос о том, как эти стратегии вписываются в концепцию эмоционального интеллекта, предполагающего именно успешное понимание эмоций и управление ими.

Необходимо отметить, что объективно проявляющийся эмоциональный интеллект и самооценка собственного умения понимать эмоции, свои и чужие, и управлять ими, могут существенно различаться (что ранее было показано, в частности, нами при сопоставлении разных методов измерения эмоционального интеллекта). Настоящая работа направлена на выявление взаимосвязей самооценки эмоционального интеллекта и частоты использования различных стратегий регуляции эмоций.

Мы попытались ответить на вопросы: использование каких стратегий регуляции эмоций побуждает человека считать, что он управляет своими эмоциями? Какие, напротив, связаны с потерей уверенности в этой способности? Что объясняет эти взаимосвязи?

Методы – 1

Выборка первой части исследования составила 130 человек, из них 71 женщина и 59 мужчин в возрасте от 24 до 60 лет, средний возраст 36,6 лет.

Использовали вербальные опросники: ЭмИн Д. Люсина [5], опросник когнитивной регуляции эмоций [6], руминаций, опросник подавления мыслей и опросник эмоциональной регуляции [7].

Результаты и обсуждение – 1

Результаты корреляционного анализа показателей компонентов эмоционального интеллекта и способов регуляции эмоций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Взаимосвязь стратегий регуляции эмоций и компонентов эмоционального интеллекта, коэффициент корреляции Пирсона

Стратегии регуляции эмоций	МП	МУ	ВП	ВУ
Подавление эмоциональной экспрессии	-0,22*	-0,19	-0,21*	0,05
Самообвинение	-0,01	-0,01	-0,16	-0,26*
Смирение	0,19	0,17	0,08	0,05
Позитивная перефокусировка	0,15	0,18	0,14	0,33**
Фокусирование на планировании	0,16	0,23*	0,31**	0,37***
Позитивная переоценка	0,50***	0,52***	0,32**	0,51***
Рассмотрение в перспективе	0,12	0,09	0,09	0,09
Катастрофизация	-0,24*	-0,38***	-0,32**	-0,53***
Обвинение других	-0,14	-0,18	-0,25*	-0,31**
Подавление мыслей	-0,22	-0,31**	-0,43***	-0,50***
Руминации	-0,19	-0,22*	-0,36**	-0,58***

Примечания:
МП – понимание эмоций в межличностных взаимодействиях,
МУ – управление эмоциями в межличностных взаимодействиях,
ВП – понимание своих эмоций,
ВУ – управление своими эмоциями,
* – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$, *** – $p < 0,001$.

Наибольшее число значимых связей стратегий регуляции эмоций, как и ожидалось, выявлено с представлением об умении управлять собственными эмоциями. Оно прямо связано с перенесением фокуса внимания с отрицательных аспектов ситуации на положительные, сосредоточении внимания на планировании разрешения неприятной ситуации, позитивной переоценке негативной ситуации.

Отрицательные связи показаны с обвинением себя и других в сложившейся ситуации (перенесением фокуса внимания с текущей ситуации на свои или чужие прошлые действия); с руминациями (навязчивыми размышлениями о негативных ситуациях прошлого, о прошлых причинах данной ситуации; также перенос фокуса внимания в прошлое); с катастрофизацией (переносом внимания на будущие преувеличено отрицательные последствия ситуации), с подавлением мыслей, вызывающих отрицательные эмоции. То есть практически весь спектр условно неэффективных стратегий регуляции эмоций связан со снижением оценки своей способности управлять собственными эмоциями.

Не показали никаких связей такие стратегии регуляции эмоций, как рассмотрение нежелательной ситуации в перспективе – сравнение ее с худшими ситуациями, которые существуют или могли бы существовать; смирение с ситуацией – принятие ее как данности, без попыток разрешить; а также с подавлением эмоциональной экспрессии в межличностных контактах. При этом подавление эмоциональной экспрессии обратно связано с пониманием собственных и чужих эмоций. Возможно, что общая установка на то, что эмоции должны подавляться, ведет к тому, что внимание смещается как с собственных, так и с чужих эмоций, затрудняет обучение их распознаванию.

Самой благоприятной для функционирования эмоционального интеллекта оказалась позитивная переоценка – она высокозначимо прямо связана со всеми рассмотренными его компонентами. Похоже, что данная стратегия позволяет соприкоснуться с негативными эмоциями, а затем перевести их в положительные, предоставляя тем самым возможность эффективной саморегуляции.

Наименее благоприятна катастрофизация, по-видимому, блокирующая проявление широкого спектра эмоций, редуцируя их до тревоги, страха – ожидания неблагоприятного исхода ситуации, а также создающая впечатление невозможности справиться со своим эмоциональным состоянием.

Обратные связи почти со всеми компонентами эмоционального интеллекта имеют также подавление мыслей, вызывающих отрицательные эмоции и руминации.

В целом можно заключить, что прямые связи с компонентами эмоционального интеллекта имеют те стратегии регуляции эмоций, которые позволяют соприкасаться с ситуацией, оставаться в текущем моменте, обратные связи имеют стратегии избегания, направленные в прошлое (обвинение, самообвинение, руминации), будущее (катастрофизация) или «в никуда» (попытка подавить мешающие мысли).

На основе этого мы выдвинули следующее предположение: что возможность оставаться в контакте с ситуацией связана с другими, более общими компонентами саморегуляции. На роль такого компонента, с нашей точки зрения, претендует, прежде всего, волевой контроль.

Методы – 2

Для проверки данного предположения нами была сформирована выборка, включившая 84 участника (58 женщин и 21 мужчина) в возрасте от 17 до 60 лет, средний возраст – 27,3 года.

Респондентам было предложено заполнить те же четыре вербальных опосника, измеряющие стратегии регуляции эмоций, а также опросник волевого самоконтроля А.Г. Зверькова и Е.В. Эйдмана [8].

Результаты и обсуждение – 2

Результаты корреляционного анализа показателей волевой саморегуляции и регуляции эмоций приведены в табл. 2.

Таблица 2

Взаимосвязь стратегий регуляции эмоций и компонентов эмоционального интеллекта, коэффициент корреляции Пирсона

Стратегии эмоциональной регуляции	Настойчивость	Самообладание	Общий показатель воли
Подавление эмоциональной экспрессии	0,04	0,11	0,08
Самообвинение	-0,22*	-0,21	-0,24*
Смирение	-0,17	-0,16	-0,17
Позитивная перефокусировка	0,11	0,02	0,09
Фокусирование на планировании	0,42***	0,32**	0,42***
Позитивная переоценка	0,38***	0,20	0,34**
Рассмотрение в перспективе	0,08	0,00	0,05
Катастрофизация	-0,23*	-0,28**	-0,26*
Обвинение других	-0,01	0,00	0,01
Подавление мыслей	-0,31**	-0,40***	-0,35**
Руминации	-0,36***	-0,30**	-0,36***

Примечания: * – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$, *** – $p < 0,001$.

Действительно, как мы и ожидали, когнитивная переоценка и фокусирование на планировании показали значимые прямые связи с общим показателем воли и его компонентами. Позитивная перефокусировка, по нашим данным, не связана с волевой саморегуляцией. Нужно отметить, что и с эмоциональным интеллектом она связана в наименьшей степени из трех рассмотренных стратегий эмоциональной регуляции.

Руминации, подавление мыслей, катастрофизация имеют значимые обратные связи с общим показателем воли и обеими его составляющими. Для самообвинения показана обратная взаимосвязь с волевой саморегуляцией, подобная связь не выявлена для обвинения других людей. Только отсутствие последней связи отличает характер связей стратегий эмоциональной регуляции с эмоциональным интеллектом от характера их связей с волевым контролем, в остальном он очень сходен.

Заключение

Таким образом, мы заключаем, что субъективное представление об умении управлять своими эмоциями тесно связано с предпочтением условно эффективных стратегий регуляции эмоций, главная характеристика которых – сохранение контакта с проблемной ситуацией. Представление о неумении управлять собственными эмоциями связано с предпочтением условно неэффективных стратегий регуляции эмоций, предполагающих ту или иную форму ухода от проблемной ситуации. Сохранение возможности контакта с ситуацией, вызывающей отрицательные эмоции, возможно, связано с более высоким уровнем волевой саморегуляции.

Представление о понимании своих эмоций в структуре эмоционального интеллекта показывает картину взаимосвязей со стратегиями регуляции эмоций, большей частью сходную с таковой для управления своими эмоциями. Похоже, что для понимания собственных эмоций важно, почти в той же мере, находиться в контакте с проблемными ситуациями. Это может позволить «включать» стратегии регуляции эмоций уже после вхождения в контакт с реальным эмоциогенным стимулом, что дает возможность почувствовать свои первичные эмоции, возникающие в ответ на стимул.

Литература

1. *Mayer J.D., Salovey P.* What is emotional intelligence? / Emotional development and emotional Intelligence: Educational Implications / ed. by P. Salovey, D. Sluyter. New York: Perseus Books Group, 1997. P. 3–31.

2. *Gross J.J., Thomson R.A.* Emotion Regulation: Conceptual foundations / Handbook of Emotion Regulation /ed. by J.J. Gross. New York: Guilford Press, 2007. P. 3–24.

3. *Падун М.А.* Регуляция эмоций и ее нарушения // Психологические исследования. 2015. Т. 8, № 39. С. 5. URL: http://psystudy.ru (дата обращения: 14.05.2019).

4. *Wegner D.M., Zanakos S.* Chronic Thought suppression // Journal of Personality. 1994. № 62. P. 615–640.

5. *Люсин Д.В.* Новая методика для измерения эмоционального интеллекта: опросник ЭмИн // Психологическая диагностика. 2006. № 4. С. 3–22.

6. *Рассказова Е.И., Леонова А.Б., Плужников И.В.* Разработка русскоязычной версии опросника когнитивной регуляции эмоций // Вестник МГУ. Сер. Психология. 2011. № 4. С. 161–179.

7. *Дорошева Е.А., Князев Г.Г.* Психометрические свойства трех опросников регуляции эмоций // Современные проблемы клинической психологии и психологии личности. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Новосибирск, 2017. С. 193–198.

8. *Зеличенко А.И., Карлинская И.М., Пантелеев С.Р., Шмелев А.Г., Эйдман Е.В.* Практикум по психодиагностике. Психодиагностика мотивации и саморегуляции. М. : Изд-во МГУ, 1990.

Возможности квантовой механики в когнитивных науках

В.М. Еськов[1], Ю.П. Зинченко[2], М.А. Филатов[1], С.В. Григорьева[1]

[1]ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований РАН.
Обособленное подразделение «ФНЦ НИИСИ РАН», Сургут
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Последние годы в психологической, физической и биофизической литературе активно обсуждаются возможности применения квантовой механики, ее подходов в описании сознания человека. Характерная публикация М.Б. Менского «Сознание и квантовая механика» [7] реально описывает перспективы квантовой механики для изучения работы мозга, нейросетей мозга (НСМ) с позиций квантовой механики. В этой связи остро возникает проблема сходства и различий в динамике поведения НСМ и различных объектов квантовой механики (в частности, электрона в атоме или в потенциальной яме). Главная проблема при этом: в чем сходство и различие квантовых объектов с динамикой НСМ, с его сознанием? Отметим, что реальные доказательства возможности квантового подхода в психологии (со стороны самих психологов) пока отсутствуют [3, 4].

Поскольку наиболее доступный при изучении НСМ объект – это биопотенциалы мозга (в виде электроэнцефалограмм – ЭЭГ), то уместно бы было выполнить определенный анализ поведения переменных $x_i(t)$, описывающих динамику ЭЭГ в виде колебаний биопотенциалов ($x_i(t)$ измеряется в милливольтах), с позиций квантовой механики. Именно такой анализ мы сейчас и выполняем в настоящем сообщении с позиций психофизиологии (в частности, на основе анализа данных электроэнцефалографии) и с позиций квантовой механики [4]. При этом используется принцип неопределенности Гейзенберга из квантовой механики и новые представления о хаосе НСМ, которые выполнены на основе анализа ЭЭГ [3, 4, 11].

Отметим, что для ЭЭГ характерна динамика статистической неустойчивости параметров (выборок $x_i(t)$ ЭЭГ) в виде эффекта Еськова – Зинченко. Это имеет принципиальное значение для дальнейшего понимания работы НСМ и сознания человека. Именно это и является главной объединяющей идеей для квантовой механики и психологии (при изучении сознания человека). Хаос и непрерывные возбуждения НСМ (в виде ЭЭГ) – это основа такого нового подхода в оценке сознания.

Объект и методы

Исследования выполнены на 14 добровольцах, в рамках Хельсинской декларации. У всех испытуемых (в спокойном состоянии, сидя) регистрировались ЭЭГ многократно (по 15 раз) за фиксированный интервал времени T с одной и той же области мозга. Полученные (непрерывно изменяющиеся в виде функций $x = x(t)$) биопотенциалы мозга (ЭЭГ) квантовались, и дискретные значения $x(t)$ в виде выборок ЭЭГ регистрировались в виде файлов ЭЭГ в ЭВМ.

Для каждого испытуемого было получено по 15 таких файлов (с одной области мозга), и затем эти 15 разных выборок ЭЭГ статистически сравнивались (по критерию Вилкоксона p) в виде матрицы парных сравнений выборок ЭЭГ. Были построены матрицы парных сравнений выборок ЭЭГ, в которых вносились эти критерии Вилкоксона p в виде элементов таких матриц. Если $p_{jk} \geq 0{,}05$, то считалось, что j-я и k-я выборки имеют одинаковую генеральную совокупность, т. е. они (эти выборки) статистически совпадают [8, 9].

Результаты исследования и обсуждение

Сразу отметим, что все полученные матрицы парных сравнений выборок ЭЭГ одного и того же испытуемого показывают сравнительно небольшое число k пар сравнений выборок, которые статистически совпадают (т. е. эту пару выборок ЭЭГ можно отнести к одной генеральной совокупности), и для них $p_{jk} \geq 0{,}05$. В качестве примера представляем характерную табл. 1, где число k совпадений выборок невелико – $k_1 = 33$. В любом случае для ЭЭГ $k \leq 40$ % из всех 105 независимых пар сравнений выборок ЭЭГ в любой такой матрице парных сравнений выборок ЭЭГ.

Таблица 1

Матрица парного сравнения ЭЭГ одного и того же здорового человека (число повторов $N = 15$) в период релаксации в отведении T6-Ref

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0.00	**0.32**	**0.05**	0.10	**0.64**	0.01	**0.55**	0.00	**0.28**	**0.31**	0.00	**0.90**	0.00	0.00
2	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.58**
3	0.32	0.00		**0.75**	0.00	0.03	**0.67**	**0.19**	0.00	0.01	**0.30**	0.02	**0.10**	0.00	0.00
4	0.05	0.00	0.75		0.00	**0.07**	**0.83**	0.00	0.00	0.00	**0.06**	0.03	0.04	0.00	0.00
5	0.10	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	**0.41**	**0.38**	**0.66**	0.03	0.00	**0.21**	0.00	0.00
6	0.64	0.00	0.03	0.07	0.00		**0.21**	**0.86**	0.00	**0.21**	**0.52**	0.00	**0.66**	0.00	0.00
7	0.01	0.00	0.67	0.83	0.00	0.21		0.02	0.00	0.00	0.01	**0.19**	0.00	0.00	0.00
8	0.55	0.00	0.19	0.00	0.41	0.86	0.02		**0.08**	**0.93**	**0.15**	0.00	**0.97**	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	0.08		**0.06**	0.00	0.00	**0.07**	0.00	0.01
10	0.28	0.00	0.01	0.00	0.66	0.21	0.00	0.93	0.06		0.00	0.00	**0.36**	0.00	0.00
11	0.31	0.00	0.30	0.06	0.03	0.52	0.01	0.15	0.00	0.00		0.00	0.05	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
13	0.90	0.00	0.10	0.04	0.21	0.66	0.00	0.97	0.07	0.36	0.05	0.00		0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00
15	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Примечание: использовался критерий Вилкоксона (значимость $p < 0{,}05$, число совпадений $k_1 = 33$).

С позиций современной науки (детерминистской и стохастической науки), мы должны иметь $k \geq 95$ % (этого требует статистика, если выборки однородны). Однако важно подчеркнуть доказанный нами факт (несколько сотен испытуемых): почти все пары в табл. 1 (и ей подобных) имеют свои особые (разные) генеральные совокупности. Только в отдельных случаях мы можем иметь ста-

тистическое совпадение сразу 3 или 4 пар сравнений выборок ЭЭГ, как итоговую работу НСМ. Это означает, что все выборки ЭЭГ (для одного испытуемого, в неизменном гомеостазе, у нас это 15 выборок ЭЭГ) не могут иметь одну общую генеральную совокупность. Они статистически существенно различаются!

Эффект Еськова – Зинченко, демонстрирующий статистическую неоднородность выборок ЭЭГ и ЭМГ одного и того же испытуемого или группы [3, 4, 10, 11], накладывает серьезное ограничение на дальнейшее применение традиционной статистики в психологии и науках о мозге. Если выборки статистически не совпадают, если они непрерывно и хаотически меняются, то как тогда изучать ЭЭГ, ЭМГ и их другие характеристики (и параметры в виде спектральной плотности сигнала – СПС, автокорреляций $A(t)$ и т. д.), описывающих работу НМС, нашего сознания? Как описывать психические процессы и организацию движений, если выборки не однородны?

Наблюдается непрерывный хаос и движение вектора состояния ЭЭГ $x = (x_1, x_2)^T$, где $x_1(t)$ – это динамика изменения биопотенциалов – ЭЭГ, а $x_2 = dx_1/dt$ – скорость изменения параметров ЭЭГ. Эти две фазовые координаты – $x_1(t)$ и $x_2(t)$ – непрерывно и хаотически изменяются в таком двумерном фазовом пространстве состояний вектора $(x_1, x_2)^T$. Имеется сходная динамика в квантовой механике, и она наблюдается в любых квантово-механических системах. Мы не можем получить (и зафиксировать, повторить) для электрона в атоме его конкретное состояние (т. е., например, чтобы $dx / dt = 0$ для электрона в атоме) и не можем ограничить его положение в атоме (в виде точки). Электроны непрерывно движутся ($dx / dt \neq 0$), и для его координаты $x_1(t)$ и скорости $x_2(t)$ имеется принцип неопределенности Гейзенберга. Сейчас мы высказываем гипотезу, что и для ЭЭГ, и ЭМГ мы тоже будем иметь некоторый аналог этого принципа Гейзенберга, в виде ограничений на изменения значений x_1 и x_2 [3, 4, 6, 10, 11].

Напомним, что согласно принципу Гейзенберга, мы имеем ограничение на x_1 и x_2 в виде $\Delta x_1 * \Delta x_2 \geq h/(4\pi m)$, где h – постоянная Планка, m – масса электрона. Аналогичное неравенство в рамках новой теории хаоса-самоорганизации [4] мы сейчас вводим как некоторую (сходную) систему неравенств и для параметров ЭЭГ. В рамках нового квантового подхода в психологии (как науке о сознании человека) мы ограничиваем двумя константами Z_{max} и Z_{min} вариационные размахи (Δx_1 и Δx_2 для ЭЭГ и ЭМГ), для фазовых координат x_1 и x_2 ЭМГ и ЭЭГ вводится аналог принципа неопределенности Гейзенберга, что приближает психологию к квантовой физике. На фазовые координаты ЭЭГ и ЭМГ испытуемого (накладываются ограничения) в виде неравенства $Z_{max} > \Delta x_1 * \Delta x_2 > Z_{min}$, что весьма похоже на принцип Гейзенберга. И впервые мы перебрасываем мостик между психологией и квантовой механикой. Отметим, что это объединение принципов произошло спустя почти 100 лет с момента образования квантовой механики.

Таким введением аналога принципа Гейзенберга мы приближаем управление (со стороны сознания) и работу НМС к квантовым объектам. Более того, на основании эффекта Еськова – Зинченко мы говорим об отсутствии произвольного повторения как начального значения ЭЭГ ($x(t_0)$ – неповторим), так и всей ЭЭГ для любого человека в неизменном гомеостазе [3–6, 10, 11]. Иными словами, работа мозга, его нейросетей происходит хаотически (в режиме непрерывных реверберераций) [3, 4, 6]. В квантовой механике мы тоже не можем повторить начальное состояния электрона в атоме и его траекторию (произвольно). Электрон непрерывно и хаотически движется (у него нет нулевой скорости, $dx / dt \neq 0$). Работа НСМ и ими управляемой НМС тоже имеет такой же характер неопределенности. Любое состояние НСМ не может быть повторено произвольно человеком не только в рамках функционального анализа, но и с позиций статистики [9–11]. Все выборки ЭЭГ и их СПС непрерывно и хаотически изменяются (см. табл. 1). Хаос и непрерывные реверберации характерны и для ЭЭГ, и для периферии (ЭМГ – электромиограмма). Биопотенциалы неустойчивы. С этих позиций мозг уже является квантово-механической системой, он подобен квантовым частицам (например, электрон в атоме).

Отметим, что сейчас мы это доказываем количественно в виде эффекта Еськова – Зинченко, но следует напомнить о свойствах НСМ – о том, что 80 миллиардов нейронов с 1000 синапсов для каждого нейрона не могут обеспечить повторение состояния возбуждая (одинаково) всех этих 150 миллиардов. Все хаотически и непрерывно изменяется. Но количественное подтверждение этому на макроуровне (у нас это ЭЭГ и ЭМГ) мы сейчас представили на основе построения матриц парных сравнений выборок (см. табл. 1). Эти матрицы не только доказывают статистическую неустойчивость выборок ЭЭГ и ЭМГ, но и отсутствие однородности выборок.

Подчеркнем, что в квантовой механике ее объекты не могут быть точно определены, но для них существуют ψ-функция (и плотность вероятности), что в теории хаоса-самоорганизации отсутствует для ЭЭГ. Для них применим принцип неопределенности Гейзенберга, когда точно не определены значения x_1 и x_2, а мы работаем с вариациями. Реальными свойствами неопределенности (подобными квантовым частицам) обладают и НСМ. Более того, сознание всегда реализует один из миллиарда возможных вариантов управления движением, работы сердца, поведения человека. В НСМ всегда имеется множество других возможных реальностей (как в параллельных мирах Хью Эверетта III, в его многомировой интерпретации квантовой механики). В сознании человека всегда существуют миллионы параллельных возможных реализаций управления поведением человека, но в действительности мы всегда имеем одну реализацию (у нас речь идет об одной выборке ЭМГ). В другой момент времени T мы получим другую выборку ЭМГ (это и есть другая реализа-

ция, другой мир Эверетта). Однако миры реализации ЭЭГ или ЭМГ всегда наблюдаемы и конкретны (на каждой реализации), в отличие от миров Эверетта.

Сейчас мы доказали, что любая реализация движений (работы мышц (ЭМГ), сердца, других биосистем) будет осуществляться всегда уникально [3, 5, 8, 10, 11]. Следующая реализация – это другой мир Эверетта, который реально наблюдается (что в квантовой механике выполнить сложно) и в этом отличия теории хаоса-самоорганизации от квантовой механики. Такая трактовка квантового подхода в описании сознания – это реальная иллюстрация множества миров в НСМ человека, в его сознании. На любом отрезке времени ΔT мы имеем свою, особую реализацию сознания, работы НСМ [3, 10, 11]. Человек в этом случае представляется не одной вселенной, а некоторым набором параллельных вселенных (речь идет о «вселенных» сознания), когда реализация происходит, но ее точное (статистическое) повторение не может быть реализовано.

Подчеркнем, что это не аллегория, а реальность. 80 миллиардов нервных клеток (с их еще большим числом синапсов) имеет число состояний гораздо больше 10^{100}. Это число существенно превышает число всех элементарных частиц в нашей вселенной. Поэтому мозг может иметь число состояний гораздо больше, чем число всех частиц во Вселенной. Мозг как бы имеет несколько вселенных (вложенных друг в друга) сразу, но каждое управление НМС, например, реализуется центральной нервной системой (и сознанием тоже) конкретно (разово и уникально).

Заключение

Сейчас становится очевидным, что любое управление в организме (у нас речь идет о движении) не реализуется одинаково. Эффект Еськова – Зинченко доказывает, что сама биоэлектрическая активность нейросети мозга (в виде ЭЭГ) реализует (оптимальную) работу организма в хаотическом режиме, без повторений (как об этом и писал Н.А. Бернштейн в 1947 г.: «повторение без повторений») [1].

Для описания работы НСМ вводится принцип неопределенности Гейзенберга (его аналог), фактически вводятся два принципа неопределенности в теории хаоса-самоорганизации. Это все приводит к хаосу в работе мозга, его НСМ и создает параллельные миры Эверетта в сознании человека. Все повторяется, но «без повторений» (на это и обращал внимание в 1947 г. Н.А. Бернштейн) [1].

У квантовых объектов с сознанием (и с НСМ) имеется много общего: невозможно произвольно повторить начальное ($x(t_0)$) и конечное ($x(t_k)$) состояния системы, выполняется принцип неопределенности на вариациях Δx_1 и Δx_2 для любой координаты гомеостаза (у нас это выборки ЭЭГ и ЭМГ) [3, 4, 10, 11].

Литература

1. *Бернштейн Н.А.* О построении движений. М. : Медгиз, 1947. 254 с.
2. *Еськов В.В., Филатова О.Е., Башкатова Ю.В., Филатова Д.Ю., Иляшенко Л.К.* Особенности возрастных изменений кардиоинтервалов у жителей севера России // Экология человека. 2019. № 2. С. 21–26.
3. *Зинченко Ю.П., Еськов В.М., Григорьева С.В., Майстренко В.И.* Нейрокомпьютерные модели эвристической деятельности мозга человека // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2018. №3. С. 109–127.
4. *Зинченко Ю.П., Еськов В.М., Еськов В.В.* Понятие эволюции Гленсдорфа – Пригожина и проблема гомеостатического регулирования в психофизиологии. // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. 2016. № 1. С. 3–24.
5. *Зинченко Ю.П., Филатов М.А., Колосова А.И., Макеева С.В*. Сравнительный стохастический и хаотический анализ параметров внимания учащихся в аспекте их работоспособности // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2017. № 4. С. 21–33.
6. *Зинченко Ю.П., Хадарцев А.А., Филатова О.Е.* Введение в биофизику гомеостатических систем (Complexity) // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 3. С. 6–15.
7. *Менский М.Б.* Сознание и квантовая механика. Фрязино : Век 2, 2011. 320 с.
8. *Филатова Д.Ю., Башкатова Ю.В., Филатов М.А., Иляшенко Л.К.* Анализ параметров деятельности сердечно-сосудистой системы у школьников в условиях широтных перемещений // Экология человека. 2018. № 4. С. 30–35.
9. *Филатова О.Е., Берестин Д.К., Иляшенко Л.К., Башкатова Ю.В.* Влияние гипотермии на параметры электромиограмм при малых напряжениях мышц // Экология человека. 2019. № 5. С. 43–48. DOI: DOI:
10. *Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V. and Vochmina Yu.V.* Formalization of the Effect of “Repetition without Repetition” Discovered by N.A. Bernshtein // Biophysics. 2017. Vol. 62, № 1. P. 143–150.
11. *Eskov V.M., Pyatin V.F., Eskov V.V., Ilyashenko L.K.* Heuristic work of the brain and artificial neural networks // Biophysics. 2019. Vol. 64. No. 2. P. 125–130.

Методы анализа электрической активности головного мозга человека и расчета объективных численных критериев колебательной активности на ЭЭГ-сигналах

М.О. Журавлев, А.Е. Руннова

АНО ВО «Университет Иннополис», г. Иннополис

Мозг является одним из наиболее сложных и загадочных объектов для комплексных исследований, привлекающий в последние десятилетия интерес широкой научной общественности [1–3]. Динамика мозга изучается специалистами из различных областей науки, в том числе нейрофизиологии, медицины, физики, математики, нелинейной динамики и т. д.; сочетание разнообразных подходов и проведение многопрофильных исследований зачастую предоставляют возможности для более глубокого понимания механизмов, лежащих в основе динамики мозга, и могут открыть перспективные возможности в медицине и нейротехнологиях.

В настоящее время одним из самых распространенных методов, используемых в исследованиях активности головного мозга, является анализ ЭЭГ, который дает представление о структуре работы коры головного мозга и ее функциональных особенностях. В рамках настоящей работы была проведена адаптация методик анализа многоканальных записей электрической активности головного мозга во время решения различного рода когнитивных задач. Необходимость решения данной задачи обусловлена в первую очередь тем, что записи активности головного мозга человека являются достаточно уникальными, причем каждая конкретная запись обладает своими уникальными характеристиками и особенностями, такая особенность экспериментальных данных справедлива как для разных испытуемых, так и для различных записей одного и того же испытуемого.

В рамках настоящей работы была предложена модифицированная методика для объективного частотно-временного анализа ЭЭГ-данных, основанная на использовании «скелетонов» поверхности мгновенной энергии непрерывного вейвлетного преобразования с комплексными базисами [4, 5]:

$$W(s,t_0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi^* \left(\frac{t-t_0}{s} \right) dt; \qquad (1)$$

с материнским вейвлетом Морле:

$$\psi(\eta) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \exp(j\Omega_0\eta) \exp\left(\frac{-\eta^2}{2} \right). \qquad (2)$$

Стоит отметить, что при использовании данной методики, как правило, ограничиваются первыми тремя максимальными значениями мгновенной энергии непрерывного вейвлетного преобразования в каждый момент времени. Тем не менее такое допущение не всегда является корректным, так как при активности головного мозга человека постоянно существуют различные частотно-временные структуры, причем интенсивность возникающих частотных паттернов в течение времени их существования может меняться значительно, при этом необходимо также учитывать «конкуренции» различных ритмов в активности головного мозга. Таким образом, оценка существования частотно-временных структур по первым трем максимумам мгновенной энергии является не совсем верной.

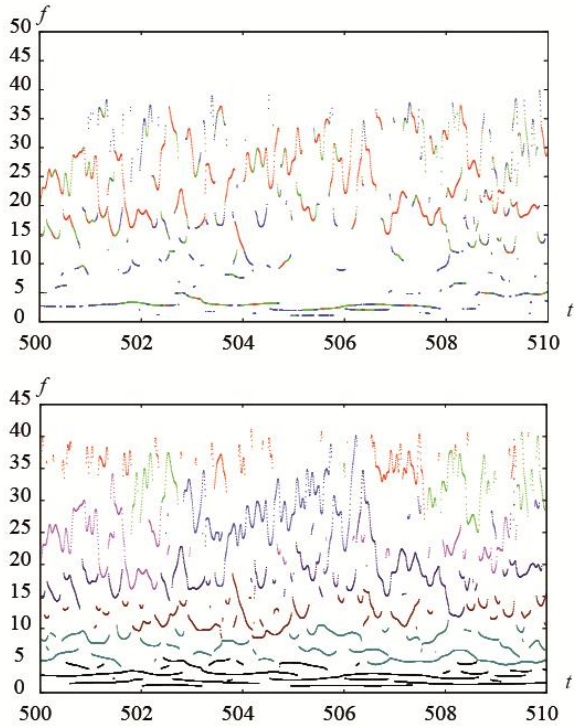


Рис. 1. Сравнение обычной «скелетной» методики анализа энергетических поверхностей (представлены первые три максимума поверхности – вверху) и методики, позволяющей выделять частотно-временные паттерны (внизу) для канала P4

В связи с этим для объективного детектирования существующей колебательной активности в ЭЭГ-сигналах предполагается учитывать все имеющиеся максимумы мгновенной энергии непрерывного вейвлетного преобразования в каждый момент времени. Тем не менее просто учитывать эти максимумы недостаточно, необходимо именно выделять возникающие частотно-временные паттерны в многоканальных данных ЭЭГ, следить за их эволюцией во времени. Для этого

был разработан алгоритм анализа «скелетных» максимумов энергии непрерывного вейвлетного преобразования, позволяющий выделять существующие в каждый момент времени частотно-временные паттерны в каждом из каналов ЭЭГ.

Данная методика основана на оценке существовавших на предшествующем шаге по времени максимумов (колебательных режимов с заданными частотами) с максимумами, существующими в данный момент времени. При этом было введено достаточное условие $|f_i - f_{i-1}| \leq 0{,}5$ Гц, и тогда получаем, что паттерн с частотой f_i на i-м шаге также существовал и на предшествующем шаге по времени, но с частотой f_{i-1}. Такое простое представление позволяет отследить все возникающие паттерны в активности головного мозга вне зависимости от мощности колебаний, что в свою очередь значительно повышает чувствительность используемых методик. На рисунке 1 представлено сравнение обычной «скелетной» методики анализа энергетических поверхностей и методики, позволяющей выделять частотно-временные паттерны. Очевидно, что результаты, полученные с использование второго метода, дают более полную картину активности головного мозга испытуемого, что в свою очередь позволит со значительно большей точностью производить мониторинг состояния испытуемого во время решения различного рода когнитивных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-32-80036).

Литература

1. *Hramov A. E. et al.,* Wavelets in Neuroscience, Springer Series in Synergetics. Springer, 2015.

2. *Bear F. et al.,* Neroscience. Exploring the brain. Woters Kluwer, 2015.

3. *Chavez M., et al*., Functional Modularity of Background Activities in Normal and Epileptic Brain Networks // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 118701.

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

5. *Torresani B.,* Continuous Wavelet Transform, Savoire, Paris, 1995.

Методы поиска и оценки выраженности паттернов воображаемой и реальной двигательной активности пациента в постинсультном периоде на основе радиофизической интерпретации ЭЭГ-сигналов

М.О. Журавлев[1,2], А.Е. Руннова[1], Ю.А. Крючков[3], Н.В. Щуковский[3]

[1]АНО ВО «Университет Иннополис», г. Иннополис
[2]Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
[3]Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

Инсульт занимает одну из лидирующих позиций в мире в структуре общей смертности и является ведущей причиной инвалидизации взрослого населения [1, 2]. К прежнему качеству жизни могут возвратиться не более 15–20 % лиц, перенесших инсульт, остальные остаются инвалидами различной степени тяжести и нуждаются в медико-социальной поддержке [3, 4]. Наиболее частыми последствиями инсультов являются двигательные нарушения в виде гемипареза или монопареза, отмечающиеся у 80 % пациентов после цереброваскулярной катастрофы, у половины из них патология сохраняется пожизненно [5, 6].

В настоящее время восстановление двигательного дефицита основано главным образом на механическом воздействии на пораженную конечность [7–9]. Использование для реабилитации и улучшения качества жизни больных неинвазивных нейрокомпьютерных интерфейсов, основанных на данных электроэнцефалографии (ЭЭГ), является перспективным и быстроразвивающимся направлением [10]. Исследования с применением данного интерфейса для обмена информацией между мозгом и внешним устройством демонстрируют положительные результаты в реабилитации [11]. Однако для успешного применения метода неинвазивного интерфейса «мозг – компьютер» в реабилитации пациентов с моторными нарушениями необходимо строго учитывать биоэлектрические особенности центральной нервной системы.

Настоящая работа была посвящена оценке особенности изменения биоэлектрической активности головного мозга в ответ на реальные и воображаемые движения у пациентов с моторными нарушениями после перенесенного инсульта для последующего применения в реабилитации метода неинвазивного интерфейса «мозг – компьютер». Для поиска и оценки выраженности паттернов воображаемой и реальной двигательной активности пациента использовались методики, основанные на применении непрерывного вейвлетного преобразования с комплексным базисом [12–14]. Стоит отметить, что использование данного подхода для частотно-временного анализа характеристик экспериментальных сигналов хорошо себя зарекомендовало и все чаще используется в исследования [12].

Применение методик, основанных на непрерывном вейвлетном преобразовании с комплексным базисом, позволило проанализировать ЭЭГ-данные и оценить доминирование частотных ритмов (δ-, θ-, α-, β-, γ-ритм) в различных областях головного мозга во время реальной двигательной активности и воображаемой. При этом были выделены следующие характерные особенности. В активной стадии экспериментальной работы у условно здоровых испытуемых для случая реальных движений отмечалось развитие высокочастотной бета-активности в сенсомоторной области коры с последующей активизацией альфа-ритма в затылочной области. Для воображаемых движений частотно-пространственная структура ЭЭГ демонстрировала схожий характер, но альфа-ритм был более выражен и наблюдался в затылочной и теменной областях. При этом область моторной коры и участок височной доли демонстрировали выраженное возрастание интенсивности β-ритма.

Для активной стадии экспериментальной работы на ЭЭГ пациентов были выявлены существенные отличия от аналогичных данных условно здоровых испытуемых. При выполнении реальных движений здоровой рукой на электроэнцефалограмме демонстрировалось смещение максимальных мощностей наблюдамых ритмов в зону высоких частот, при этом общий характер оставался близким к наблюдаемому у условно здоровых испытуемых. Однако в случае выполнения реальных движений паретичной рукой у пациентов на ЭЭГ мощность колебательной активности преобладала в низкочастотных диапазонах θ- и δ-ритмов. При этом возникало падение α- и β-активности с появлением слабых очагов гамма-ритма.

При воображении движений частотно-пространственная структура ЭЭГ не имела существенных отличий для здоровой и паретичной конечностей. В то же время общая структура ЭЭГ носила характер, приближенный к таковому у относительно здоровых испытуемых. Значительная часть энергии приходилась на α-ритм в затылочной области, но также отмечалась высокочастотная активность в β- и γ-ритмах в височной и центральной областях. Схожие результаты получены в группах относительно здоровых испытуемых и пациентов после перенесенного инсульта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам при Президенте Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (проект МК-1599.2019.9).

Литература

1. *Béjot Y. et al.* Epidemiology of stroke in Europe and trends for the 21st century // PresseMed. 2016. V. 45, №.12. P. 391–398.
2. *Камышникова К.А. и др.* Современные проблемы вторичной профилактики цереброваскулярных заболеваний // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2018. 17 (1). 171–178.
3. *Стаховская Л.В., Котов С.В.* Инсульт: руководство для врачей. М. : МИА; 2013. 400 с.
4. *Lawrence E.S. et al*. Estimates of the prevalence of acute stroke impairments and disability in a multiethnic population // Stroke. 2001. V. 32, № 6. P. 1279–1284.
5. *Hatem S.M. et al*. Rehabilitation of Motor Function after Stroke: A Multiple Systematic Review Focused on Techniques to Stimulate Upper Extremity Recovery // Frontiers in human neuroscience. 2016. V. 10. P. 442.
6. *Иванова Г.Е.* Медицинская реабилитация в России. Перспективы и развитие // Consilium Medicum. 2016. V. 18, № 2.1. P. 25–33.
7. *Хижникова А.Е. и др.* Двигательное обучение пациентов с постинсультным парезом на механотерапевтическом комплексе // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2017. Т. 95, № 1. С. 20–25.
8. *Супонева Н.А. и др.* Роботизированные и механотерапевтические технологии для восстановления функции верхних конечностей: перспективы развития (обзор). // Современные технологии в медицине. 2016. Т. 8, № 4. С. 206–215.
9. *Клочков А.С., Черникова Л.А.* Роботизированные и механотерапевтические устройства для восстановления функции руки после инсульта // РМЖ. 2014. Т. 22. С. 1589–1592.
10. *Мокиенко О.А. и др.* Интерфейс мозг-компьютер как новая технология нейрореабилитации // Анналы клинической и экспериментальной неврологии. 2011. Т. 5, № 3. С. 46–52.
11. *María A.C. et al*. Brain-Computer Interfaces for Post-Stroke Motor Rehabilitation: A Meta-Analysis // Annals of Clinical and Translational Neurology. 2018. V. 5, № 5. P. 651–663.
12. *Hramov A.E. et al.* Wavelets in Neuroscience. Springer Series in Synergetics. Spring-r, 2015.
13. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М. : Физматлит, 2003.
14. *Torresani B.* Continuous Wavelet Transform, Savoire, Paris, 1995.

Применение телеметрии функционального состояния человека для оценки эффективности и безопасности виртуального тренинга

И.О. Зайцева

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, email: irozy@yandex.ru

В современном мире все больше требований предъявляется к безопасности в виртуальном пространстве. Зарубежные авторы, например, из Научно-технического общества НАТО, в исследовании, посвященном автономной когнитивной киберзащите, особое внимание уделяют созданию алгоритмов, неотличимых от реальных людей в виртуальном пространстве [1]. Между тем, отечественные исследователи-теоретики до недавнего времени безопасность в сети Интернет сводили к защите сайтов и персональных данных [2, 3]. Лишь после «цветных революций», прокатившихся по планете, было признано, что мишенью в сети является человек [4], а информационное воздействие названо еще одним видом кибероружия, которое используется в гибридных войнах [5]. Таким образом, обеспечение когнитивной безопасности личности становится фундаментальной задачей.

Прикладной вектор в исследованиях становится актуальным в связи с масштабным перемещением психологической работы с клиентами в Интернет-среду. Благодаря развитию технологий исключительно личные (индивидуальные или групповые) встречи с психологом преобразовались в виртуальные. Доступность подобных услуг приводит к их невероятной популярности, это видно по количеству запросов и сообществ в соцсетях. Причем некоторые сообщества уже собрали более 1 млн. подписчиков. Законодательно функционирование таких проектов, в том числе и оценка их качества и безопасности для пользователей, никак не регламентировано. Существуют не только собственно психологические виртуальные тренинги, но и другие их виды, например, посвященные аутентичному движению, психосоматике, фитнес-программы и интерактивные программы похудения – все это так или иначе меняет состояние человека, однако удобных для применения в виртуальной среде методов оценки эффективности подобных мероприятий нет.

Это происходит не только из-за того, что не проработана нормативно-правовая база, но и из-за отсутствия удобных для применения в виртуальной среде методов оценки эффективности психологических тренингов. За основу при разработке подходящей модели оценки виртуальных тренингов была взята диагностика функционального состояния человека как интегральной дисциплины, включающей когнитивный, эмоциональный, вегетативный и моторный компоненты. Из многообразия методов были выбраны следующие: мобильная событийно-связанная телеметрия ритма сердца [6], тест на уровень эмоциональной дезадаптации (УЭД) [7], цветовая компьютерная кампиметрия [6].

В исследовании участвовали 30 человек от 19 до 33 лет (средний возраст 23±4,6), 5 мужчин и 25 женщин. Перед участием в эксперименте каждый человек был ознакомлен с его процедурой и подписал добровольное согласие на участие. Были разработаны три экспериментальные модели тренингового воздействия: рисование по алгоритму с сопровождением эксперта [8, 9], музыкальное воздействие композициями, которые положительно влияют на эмоциональный фон [10], и автономное рисование без инструкций. До и после испытуемые проходили компьютерную кампиметрию и тест УЭД, в течение всего эксперимента велась запись вариабельности ритма сердца.

По итогам кластерного анализа по методу К-средних выборка разделилась на три группы. 1 группа: УЭД был высоким и понизился (эффективный сценарий); 2 группа: УЭД был низкий и остался на том же уровне; 3 группа: УЭД был высокий и остался высоким (неэффективный сценарий).

Поскольку вторая группа была связана со стабильно положительным состоянием у испытуемых, она была исключена из дальнейшего анализа. На рис. 1 изображено, какие группы по эффективности воздействий представлены в разных моделях тренингов.

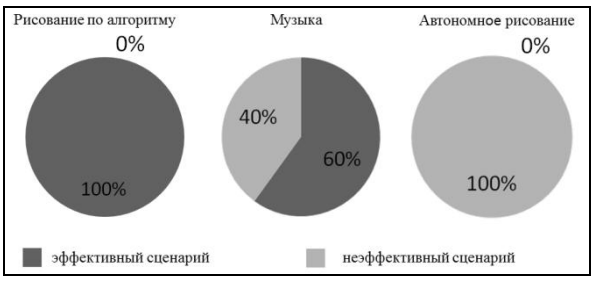


Рис. 1. Распределение испытуемых с различной динамикой УЭД по типу воздействия

Таким образом, в модели «рисование по алгоритму» изменения происходили по эффективному сценарию, в модели «музыка» – оба варианта, в «автономном рисовании» представлен только негативный сценарий.

Анализ динамики показателей вариабельности ритма сердца в различных моделях экспериментального тренинга дал следующие результаты.

- RR-интервалы значимо росли в модели «рисование по алгоритму» (p = 0,00) и «музыка»

(p = 0,00), следовательно, происходило снижение нагрузки на регуляторные системы организма;

- Спектральный показатель вариабельности ритма сердца LF значимо увеличивался в моделях «рисование по алгоритму» (p = 0,00), «музыка» (p = 0,01) и «автономное рисование» (p = 0,00), следовательно, воздействие увеличивало уровень активации симпатической нервной системы;
- Спектральный показатель вариабельности ритма сердца HF значимо не изменялся ни в одной модели воздействия;
- Спектральный показатель вариабельности ритма сердца TP значимо увеличивался в моделях «рисование по алгоритму» (p = 0,04) и «автономное рисование» (p = 0,00), следовательно, воздействие увеличивало общий адаптационный потенциал организма;
- Значимых изменений индекса вегетативного баланса не обнаружено ни в одной модели воздействия.

Далее была проведена персонифицированная оценка эффектов. На рис. 2 представлены показатели с достоверными различиями в группах по характеру динамики.

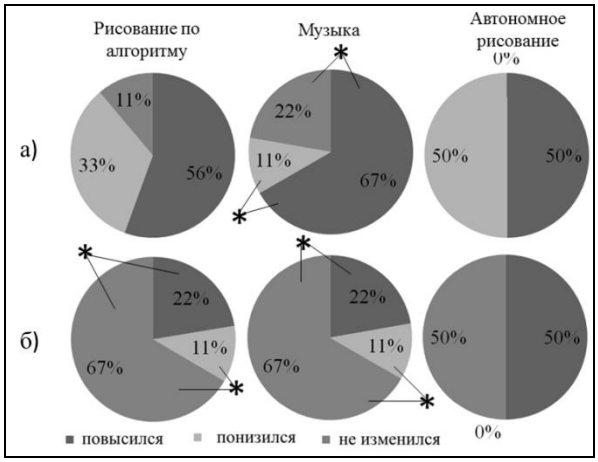


Рис. 2. Состав групп по характеру изменений показателей вариабельности ритма сердца: а) динамика RR-интервалов, б) динамика индекса вегетативного баланса

Музыкальное воздействие увеличивало интервалы между ударами сердца у большинства испытуемых. Рисование по алгоритму и автономное рисование не приводили к изменениям индекса вегетативного баланса у большей части испытуемых.

Так как была цель не только установить наличие или отсутствие изменений, но и их направленность, далее была проанализирована каждая экспериментальная модель комплексно по изменению показателей сердечного ритма. Анализ показал, что воздействие по экспериментальной модели «музыка» носит индивидуальный и ситуативный характер, а две оставшиеся модели имеют принципиальные отличия во влиянии на работу нервной системы. На рис. 3 представлен характер динамики показателей сердечного ритма в результате воздействия экспериментальных моделей «рисование по алгоритму» и «автономное рисование».

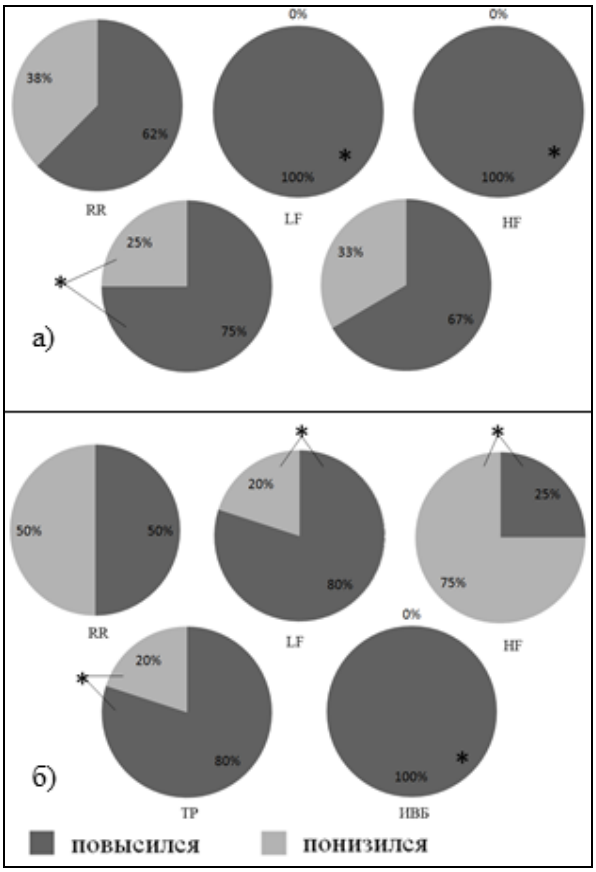


Рис. 3. Состав групп с изменениями по характеру динамики ВРС при воздействии экспериментальных моделей: а) «рисование по алгоритму», б) «автономное рисование»

Таким образом, воздействие в режиме экспериментальной модели «рисование по алгоритму» запускает оптимизационные процессы в организме, поскольку уровень активации (LF) растет вместе с уровнем устойчивости (HF) и общим адаптационным потенциалом (TP). Модель «автономное рисование», напротив, ведет к перегрузке регуляторных систем: уровень устойчивости падает в большинстве случаев.

Также исследователями было проанализировано изменение уровня эмоциональной дезадаптации в результате воздействия каждой экспериментальной модели. И достоверные изменения в сторону снижения эмоционального напряжения зафиксированы только в контексте «рисование по алгоритму».

Таким образом, в результате исследования было выяснено, какая из моделей влияет максимально позитивно – это модель, предполагающая взаимодействие с экспертом. Разработанный алгоритм оценки уже сейчас можно применять, чтобы проверить влияние виртуальных тренингов на функциональное состояние человека. Однако для более качественной экспресс-оценки необходимо развитие методов контроля.

Литература

1. *Maymir-Ducharme Fred, Angelelli Lee A., Stapleton Douglas W.* Cognitive and Autonomic Cyber Defense. STO-MP-MSG-143. 2016 DOI: 10.14339/STO-MP-MSG-143-24-PDF

2. *Макаренко С.И.* Информационная безопасность : учебное пособие / С.И. Макаренко. Ставрополь : СФ МГГУ им. М.А. Шолохова, 2009. 372 с. с ил.

3. *Шаньгин В Ф.* Информационная безопасность компьютерных систем и сетей : учеб. пособие. М. : ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2011. 416 с. с ил.

4. *Новокшанов О.Н.* Когнитивная безопасность и информационно-аналитическое противодействие [Текст] / О. Н. Новокшанов // Право и государство. 2015. № 9. С. 132–37

5. *Кефели И.Ф.* Информационно-психологическая и когнитивная безопасность / под ред. И.Ф. Кефели, Р.М. Юсупова. Санкт-Петербург : ИД «Петрополис», 2017. 300 с.

6. *Polevaya S.A., Eremin E.V., Bulanov N.A., Bakhchina A.V., Kovalchuk A.V., Parin S.B.* Event-Related Telemetry of Heart Rate for Personalized Remote Monitoring of Cognitive Functions and Stress under Conditions of Everyday Activity. Sovremennye tehnologii v medicine. 2019. vol. 11(1). P. 109–115, http://dx.doi.org/10.17691/stm2019.11.1.13

7. *Григорьева В.Н., Тхостов А.Ш.* Способ оценки эмоционального состояния человека // Патент Российской Федерации RU 2291720 C1. Опубликован 20.01.2007 в Б.И. № 2.

8. *Юнг К.Г.* Человек и его символы / К.Г. Юнг, М.-Л. фон Франц, Дж. Л. Хендерсон, И. Якоби, А. Яффе. // под общ. редакцией С.Н. Сиренко. М. : Серебряные нити, 2017. 448 с. с ил.

9. *Копытин А.И.* Современная клиническая арттерапия : учебное пособие / А.И. Копытин. М. : Когито-Центр, 2015. 526 с.

10. *Корсакова-Крейн М.Н.* Вегетативные отображения эмоциональных образов, связанных с прослушиванием коротких музыкальных фрагментов / М.Н. Корсакова-Крейн, Н.В. Мигунова, С.А. Полевая // Материалы V Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2017». Н. Новгород : Изд-во ИПФ РАН, 2017. Вып. 5. С. 122–125.

Когнитивные функции и возраст-ассоциированные патологии. Творчество против старения

В.А. Ивашкина[1], А.Г. Захарчук[2], С.В. Жеребцов[3], И.М. Спивак [3,4]

[1]email: valeryiva@yandex.ru
[2]Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, С.-Петербург
[3]Институт цитологии РАН, С.-Петербург
[4]Санкт-Петербургский политехнический университет

В настоящее время появляется все больше исследований взаимосвязи психического состояния и здоровья человека. Целью нашей работы стало определение психологических факторов, которые потенциально могли бы противодействовать появлению возраст-ассоциированных заболеваний и старению человека в целом. В качестве таковых изучались творческие способности (по методике Е.Е. Туник), религиозно-психологические установки (по Дж. Кассу с соавт.), психологические защиты (по Р. Плутчику, Л.И. Вассерману с соавт.), смысложизненные ориентации (по Д.А. Леонтьеву), измененные состояния сознания (по опроснику ИМЧ РАН) и их взаимосвязь с индексами реактивной (по Н.А. Курганскому с соавт.) и личностной невротизации (по Л.И. Вассерману с соавт.). Для оценки нарушений в когнитивной сфере использовали тест MMSE – краткое исследование психического состояния (по Folstein et al.). Анамнез респондентов оценивался по 48 показателям – как нозологическим, так и социальным. В качестве индикатора биологического возраста использовали наиболее известный на сегодняшний день показатель – среднюю длину теломер в клетках периферической крови испытуемых [1]. Кроме того, проводилось генотипирование респондентов по генам, предположительно связанным с творческими способностями и другими исследованными личностными характеристиками: гену серотонинового транспортера (5HTT), триптофан гидроксилазы (TPH1), серотонинового рецептора 2A (5HTR2A) и гену ангиотензиногена (AGT). Основную группу испытуемых составили 1035 человек в возрасте от 59 до 98 лет и 111 респондентов в возрасте от 18 до 30 лет составили контрольную группу.

При рассмотрении структуры возраст-ассоциированных заболеваний методом факторного анализа было показано, что вероятность развития нарушений в когнитивной сфере не зависит от наличия соматических патологий и коррелирует только с возрастом (фактор 4). В то же время развитие сенсорных и сомнологических нарушений могло быть обусловлено социальными показателями, такими как условия проживания (фактор 2).

При анализе психологических характеристик, предположительно, способствующих умственному долголетию, были выявлены следующие закономерности: у пожилых респондентов психологические защиты и религиозность снижают уровень невротизации и в то же время положительно коррелируют с уровнем образования (фактор 1). Вероятно, это можно объяснить тем, что более высокообразованные люди более активны в сфере духовного поиска. В контрольной группе высокий уровень внутренней религиозности и активация психологических защит способствовали снижению реактивной невротизации (фактор 3). Четвертый фактор у пожилых образовали возраст и измененные состояния сознания (ИСС). В контрольной группе ИСС показали взаимосвязь с леворукостью (фактор 5). При этом ни в одной группе уровень проявлений ИСС не коррелировал с творческими способностями.

При исследовании креативности все индексы как пожилых, так и молодых респондентов образовали один, независимый фактор (фактор 2). Была показана прямая корреляция вербальной, образной и предметно-бытовой креативности между собой и с общей оценкой творческих способностей. При этом уровень творческих способностей не коррелировал с возрастом испытуемых внутри группы, но была показана дискриминативная граница между «креативными» и «некреативными» респондентами: отдельные представители старшего поколения могли выполнить творческие задания на уровне одаренных молодых участников исследования.

В процессе психологического исследования также было сделано следующее наблюдение: из числа респондентов старшего возраста наилучшие результаты выполнения тестов, как правило, показывали испытуемые, имевшие профессию врача или учителя, т. е. те, чьи знания востребованы в социуме несмотря на возраст.

В области изучения первичных механизмов старения организмов одним из наиболее широко исследуемых на сегодняшний день потенциальных факторов, определяющих продолжительность жизни, является состояние концевых участков эукариотических хромосом – теломер. В нашей работе определение длин теломер в клетках периферической крови проводилось методом RT-ПЦР по Cawthon [2]. В результате была показана статистически значимая корреляция длин теломер с общим показателем креативности (p = 0,015). Данное положение подтвердило концепцию Н.П. Бехтеревой о том, что, по крайней мере, некоторые из известных возрастных изменений могут быть обратимы благодаря творческой активности: оживает мозг, оживает и организм [3, 4].

При этом вопрос, способствуют ли более длинные теломеры более высоким творческим

способностям, или креативность человека «удлиняет» теломеры, или обе эти характеристики определяют другие, пока не выделенные, факторы, остается открытым. Мы попытались выделить генетические предпосылки данной взаимосвязи.

Одним из первых генов, для которых в литературе была описана связь с креативностью, был ген триптофан гидроксилазы [5]. Полиморфизмы другого гена – серотонинового транспортера (5HTT) – ассоциировались со способностями к танцу [6], а также к вербальной и образной креативности [7], с религиозно-психологическими установками [8]. При изучении родового стресса была показана связь креативности с полиморфизмом гена ангиотензиногена [9].

В нашей работе было показано, что более высокая образная креативность у пожилых может быть обусловлена носительством аллеля A1 (генотипы A1A1 и A1A2) гена рецептора серотонина 2A (5HTR2A) – полиморфизм102T > C(rs6313), $p = 0{,}007$. Ген 5HTR2A расположен на 13-й хромосоме в локусе 13q14-21. Полиморфизм rs6313 заключается в однонуклеотидной замене тимина на цитозин в интроне 2. Рецепторы HTR2A в значительных количествах содержатся в гиппокампе и передней коре мозга, т. е. в структурах, тесно связанных с эмоциональными и когнитивными процессами. Носители этого «благоприятного» аллеля A1 также реже страдали болезнью Паркинсона, $p = 0{,}019$.

В контрольной группе полиморфизм M325T гена ангиотензиногена (AGT) показал ассоциацию с выполнением теста смысложизненных ориентаций: осмысленность жизни у носителей генотипов TT и MT в среднем была выше, чем у носителей генотипа MM ($p = 0{,}027$). Ген ангиотензиногена (AGT) локализован на длинном плече 1-й хромосомы в локусе 1q42-q43. Полиморфизм M325T заключается в однонуклеотидной замене тимина на цитозин во 2-м экзоне. Ангиотензиноген является частью ренин-ангиотензиновой системы, играющей ключевую роль в регуляции кровяного давления, ренальной гемодинамики, водного и электролитического гомеостаза. Также этот белок синтезируется в других тканях, включая мозг, чем, вероятно, объясняется его влияние на высшие психические функции. В то же время ни для одного из рассмотренных генов не удалось выявить корреляцию с длинами теломер.

Таким образом, дальнейший поиск генетических предпосылок творческой деятельности, других высших психологических функций и возраст-ассоциированных заболеваний представляется нам целесообразным, но, конечно, не достаточным для объяснения полученных данных.

В результате основными положениями, полученными в ходе проведенного исследования, можно считать следующие:

1. Вероятность развития нарушений в когнитивной сфере у пожилых, как правило, не зависит от наличия соматических патологий.

2. Длина теломер в клетках периферической крови у лиц пожилого возраста взаимосвязана с общим показателем креативности.

3. Уровень образования, психологические защиты и религиозность у пожилых снижают уровень невротизации и могут способствовать активному долголетию.

4. Более высокая образная креативность может быть обусловлена носительством аллеля A1 гена рецептора серотонина 2A (5HTR2A). Носители этого аллеля также реже страдают болезнью Паркинсона. В контрольной группе T-аллель гена ангиотензиногена (AGT) ассоциирован с лучшим выполнением теста смысложизненных ориентаций.

На основании полученных результатов была создана методика, которая помогает значительно улучшить самочувствие респондентов путем активизации творческого мышления, преимущественно образной креативности, у лиц любого возраста (пилотную группу составили респонденты в возрасте от 24 до 65 лет) [10].

В целом проведенное исследование позволяет надеяться на продление активного, плодотворного периода жизни благодаря развитию когнитивных функций.

Автор выражает глубокую признательность Н.В. Плескач, Т.Ю. Смирновой, А.Л. Рунову и В.М. Михельсону за помощь при выполнении работы.

Литература

1. *Михельсон В.М., Гамалей И.А.* Укорочение теломер – единственный механизм старения // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т. 50(3). С. 269–275.

2. *Cawthon R.M.* Telomere measurement by quantitative PCR // Nucleic Acids Research. 2002. Vol. 30, No. 10. Art. e47.

3. *Бехтерева Н.П.* Магия мозга и лабиринты жизни. М. : Сова, 2007. С. 312–334.

4. *Bechtereva N.P.* The usefulness of psychophysiology in the maintenance of cognitive life // Int. J Psychophysiol. 2009. Vol. 73(2). P. 83-7.

5. *Reuter M., Roth S., Holve K., Hennig J.* Identification of first candidate genes for creativity: a pilot study // Brain Res. 2006. Vol. 1069(1). P. 190-7.

6. *Bachner-Melman R., Dina C., Zohar A.H., Constantini N., Lerer E., Hoch S., Sella S., Nemanov L., Gritsenko I., Lichtenberg P., Granot R. and Ebstein R.P.* AVPR1a and SLC6A4 Gene polymorphisms are associated with creative dance performance // PLoS Genetics. 2005. Vol. 1(3). Art. e42.

7. *Volf N.V., Kulikov A.V., Bortsov C.U., Popova N.K.* Association of verbal and figural creative achievement with polymorphism in the human serotonin transporter gene // Neuroscience Letters. 2009. Vol. 463. P. 154–157.

8. *Borg J., Andrée B., Soderstrom H., Farde L.*The serotonin system and spiritual experiences // Am. J. Psychiatry. 2004. Vol. 161(9). P. 1720-1.

9. *Спивак И.М., Сейлиева Н.А., Смирнова Т.Ю., Болотских В.М., Абрамченко В.В., Спивак Д.Л.* Полиморфизмы генов ренин-ангиотензиновой системы и их корреляция с психологическими проявлениями родового стресса // Цитология. 2008. Т. 50, № 10. С. 899–906.

10. https://vk.com/club146934304.

Символическая динамика, метаграфы и интеллект

Ю.Т. Каганов, Ю.Е. Гапанюк

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
email: kaganov.y.t@bmstu.ru, gapyu@bmstu.ru

Задача обнаружения паттернов может быть поставлена как задача обучения без учителя или задача самоорганизации. Такого рода задачи являются ключевыми при разработке теории искусственного интеллекта. В данном подходе паттерны выделяются автоматически, необходимо только поставить им в соответствие символы целевого алфавита для формирования значений целевого признака.

Выбор конкретного метода обучения без учителя или способа самоорганизации зависит от природы анализируемых физических сигналов. Одним из наиболее общих подходов, используемых для решения данной задачи, является подход на основе символической динамики и метаграфов.

1. Подход на основе символической динамики

Предпосылки к возникновению символической динамики были представлены еще в конце XIX века великими французскими математиками А. Пуанкаре и Ж. Адамаром. В дальнейшем американский математик М. Морс ввел в научный обиход само понятие «символическая динамика». Работы Р. Адлера, С. Смейла, Я. Синая, Р. Боуэна позволили расширить область исследований символической динамики. В настоящее время это направление в теории динамических систем тесно связано с представлением информации и теорией графов. Фундаментальные результаты символической динамики представлены в монографиях [1, 2].

Одной из наиболее важных задач является переход от фазового пространства динамической системы к графу состояний дискретной системы, фактически переход от «микроуровня» к «макроуровню».

Рассмотрим применение символической динамики и ее связь с теорией графов на примере двух классов динамических систем – непрерывных и дискретных. Будем рассматривать динамический процесс, развертывающийся во времени. Для непрерывных систем описание динамического процесса основано на использовании систем дифференциальных уравнений типа

$$\dot{x}(t) = f\left(x(t), p\right);\ x, \dot{x} \in R^n;\ \ p \in R^m,\ n, m \in N,$$

и начальных условий $x(0) = x_0$. Уравнения описывают состояние системы во времени. При этом будем считать, что параметры системы p изменяются под действием внешней среды.

Это изменение обусловлено оценкой системой качественной характеристики воздействия внешней среды. Такая оценка возможна на основе введения критериальной функции (целевой функции), которая в зависимости от поведения системы определяет, в свою очередь, качество воздействия внешней среды. Таким образом, благодаря этому взаимодействию появляется возможность введения семантики в поток символов, формируемых динамической системой.

Будем предполагать, что система является детерминированной. Аналогично для дискретной системы можно записать $x_{k+1} = x_k + \phi(x_k, p)$. При этом номер k можно рассматривать как дискретное время. Если решение системы представить в фазовом пространстве $(dx/dt, x)$ или (x_{k+1}, x_k), то в результате будет получена фазовая траектория, описывающая поведение системы. Для анализа решения возможно использование сечения Пуанкаре, которое позволяет выполнить отображение динамической системы на многообразие $M \subset R^{n-1}$. Динамическая система может проявлять себя как устойчивая или неустойчивая система. Рассмотрим случай, когда система описывается множеством аттракторов (например, предельных циклов). Наличие аттрактора можно связать с определенным устойчивым состоянием системы. Тогда это состояние можно идентифицировать с некоторым символом. Множество символов можно поставить в соответствие некоторому воздействию среды на динамическую систему. Тогда совокупность символов можно интерпретировать как некоторое слово. Это слово приобретает семантику в зависимости от оценки взаимодействия с внешней средой. Связь между состояниями системы в этом случае может быть описана с помощью графа перехода из одного состояния в другое.

2. Символическая динамика и метаграфы

Профессор Г.С. Осипенко в монографии [3] вводит понятие символического образа динамической системы. Фазовое пространство динамической системы разбивается на ячейки M_i, устанавливается изоморфизм между ячейками фазового пространства и вершинами v_i плоского мультиграфа $G = \langle V, E \rangle$, $v_i \in V$, $\{e_{jk}\} \in E$, где вершина v_i принадлежит множеству вершин V, а подмножество ребер $\{e_{jk}\}$ принадлежит множеству направленных ребер E. Вершины j и k связаны ориентированным ребром e_{jk} только в том случае, если траектория движения системы в фазовом пространстве предусматривает возможность перехода из ячейки M_j в ячейку M_k.

Таким образом, в монографии [3] предлагается двухуровневая модель и задается изоморфизм между верхним и нижним уровнями. Нижнему уровню соответствует фазовое пространство ди-

намической системы, а верхнему уровню – плоский мультиграф G, который содержит информацию о возможных переходах между ячейками фазового пространства динамической системы.

Рассматриваемая динамическая система может быть иерархической. В настоящее время такие системы все чаще привлекают внимание исследователей. Для обозначения такого подхода используется термин «иерархическая символическая динамика» (англ. hierarchical symbolic dynamic) [4].

Рассматриваемая динамическая система может быть основой для нескольких категориальных признаков, что требует использования нескольких графов или более сложной графовой модели, которая позволяет включить несколько графов.

Для снятия данных ограничений можно предложить вместо плоского мультиграфа использовать на верхнем уровне модель на основе сложных сетей. В качестве такой модели могут выступать различные модели на основе гиперграфов, например гиперсети. Мы детально рассмотрим вариант с использованием метаграфового подхода, который включает метаграфовую модель данных и метаграфовые агенты для обработки данных [5].

Для преобразования состояний физического сигнала в значения признаков данных можно использовать методы символической динамики. Методы символической динамики могут быть усилены подходами на основе сложных сетей, в частности метаграфовым подходом.

Важной особенностью метаграфовой модели данных является то, что с использованием концепции метавершин вершины нижнего уровня могут быть различным образом сгруппированы в метавершины верхнего уровня. Поэтому метаграфовая модель данных может быть основой для кодирования набора категориальных признаков. Вершины нижнего уровня соответствуют элементам фазового пространства динамической системы. Метавершины верхнего уровня образуют альтернативные иерархии и могут быть использованы для кодирования нескольких категориальных признаков на основе единого набора элементов фазового пространства.

Для обработки и преобразования метаграфов используется подход на основе метаграфовых агентов. Использование подхода на основе динамических метаграфовых агентов позволяет построить многоуровневую структуру агентов для формирования метаграфа признаков на базе физических сигналов.

Литература

1. *Williams S.* Symbolic dynamics and its applications. American Mathematical Society, 2002.
2. *Боуэн Р.* Методы символической динамики. М. : Мир, 1979.
3. *Osipenko G.* Dynamical systems, graphs, and algorithms. Springer-Verlag, 2007.
4. *Akintayo A., Sarkar S.* Hierarchical symbolic dynamic filtering of streaming non-stationary time series data. 2017. URL: http://arxiv.org/pdf/1702.01811v1.
5. *Черненький В.М., Гапанюк Ю.Е., Ревунков Г.И., Терехов В.И., Каганов Ю.Т.* Метаграфовый подход для описания гибридных интеллектуальных информационных систем // Прикладная информатика. 2017. № 3 (69), т. 12. С. 57–79.

Нейросетевая модель детекции известности

Я.Б. Казанович

Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН, Пущино
email: yasha@impb.ru

Распознающая память (РП) [1] представляет собой один из видов декларативной памяти. Она подразделяется на два типа: 1) вспоминание (recollection), при котором воспроизводится объект (событие) вместе с контекстом; 2) детекция известности (familiarity), при которой устанавливается факт знакомства с объектом (событием), но детальные характеристики или какая-либо контекстная информация отсутствуют [2]. При экспериментальном исследовании РП время, затрачиваемое на вспоминание, обычно существенно больше, чем время, затрачиваемое на детекцию известности. Таким образом, можно думать, что сначала происходит распознавание самого факта, что данный объект знаком, а затем вспоминаются характеристики объекта и контекст, в котором объект ранее встречался, т. е. что эти два процесса диссоциированы, по крайней мере, на уровне поведения.

Некоторые аспекты детекции известности являются парадоксальными с точки зрения того, что известно о кратковременной памяти. Например, в то время как объем кратковременной памяти обычно оценивается как 7 ± 2 элементарных объектов [3], объем памяти при детекции известности зрительных образов практически не ограничен [4, 5].

В теоретической и экспериментальной литературе, посвященной РП, нет единого мнения относительно того, являются ли два ее компонента различными стадиями одного процесса, или это два разных когнитивных процесса. Если верно последнее, то возникают вопросы: реализуются ли эти процессы различными структурами мозга и/или различными нейронными популяциями в структурах мозга, работают ли эти процессы с одними и теми же или с разными следами памяти, какие нейронные структуры задействованы в реализации указанных типов РП и какие нейронные механизмы при этом используются?

Сторонники однопроцессорной теории утверждают, что вспоминание является лишь более детальной версией детекции известности. При этом РП рассматривается как континуум, где сила следов памяти может варьировать от слабых до сильных [6–8]. Экспериментальные данные, свидетельствующие в пользу двухпроцессорной теории (dual-process theory – DPT), основаны на результатах фМРТ и на исследованиях пациентов с нарушениями мозга, приводящими к различным типам амнезии. Обзор теоретических аргументов в пользу DPT приведен в работе [9]. Согласно DPT, имеются две области, где реализуются процессы РП, – это гиппокамп и медиальная височная кора. В одних работах приводятся аргументы в пользу того, что гиппокамп отвечает за вспоминание, а перириналная кора – за детекцию известности [10–13]. В других исследованиях получены экспериментальные данные, свидетельствующие, что гиппокамп участвует в обоих видах РП [14]. Кроме того, обнаружено, что повреждение энторинальной коры ведет к дефициту детекции известности, но не вспоминания [15].

Расхождения в имеющихся теориях потребовали их проверки с помощью математических моделей. Эти модели были построены в рамках DPT на основе сетей Хопфилда [16] с рекуррентными связями типа «все на всех». Было показано, что емкость памяти таких сетей в случае хеббовского обучения при вспоминании имеет порядок $0{,}14N$ (N – число элементов в сети) [17], а при детекции известности – $0{,}023N^2$ [18]. Таким образом, моделирование показало, что на уровне формальной нейронной сети можно воспроизвести экспериментальные данные по радикальному увеличению емкости памяти при запоминании без контекста (с последующей детекцией известности) по сравнению с запоминанием с контекстом (с последующим вспоминанием).

В данной работе будет описана модель детекции известности, предназначенная для запоминания и детекции известности последовательностей, состоящих из m целых чисел в диапазоне от 1 до n. Модель отличается от разработанных ранее в следующих отношениях:

1) модель реализует запоминание не стационарных бинарных паттернов, а последовательностей, закодированных целыми числами;

2) модель построена на принципах и архитектуре, принципиально отличающихся от сетей Хопфилда;

3) модель имеет емкость памяти большую, чем модели хопфилдовского типа.

Архитектура нейронной сети

Сеть состоит из входного слоя, содержащего n нейронов, промежуточного слоя, содержащего m однослойных модулей с n нейронами в каждом модуле, и выходного слоя, состоящего из одного нейрона, предназначенного для принятия решения относительно известности или новизны предъявленной последовательности (рис. 1). Входная последовательность идентифицируется как новая, если в ответ на ее предъявление выходной нейрон генерирует сигнал 0; последовательность идентифицируется как известная, если в ответ на ее предъявление выходной нейрон генерирует 1.

Все связи в сети имеют тип «снизу вверх». Входной слой имеет связи «все на всех» со всеми нейронами промежуточного слоя. Все нейроны

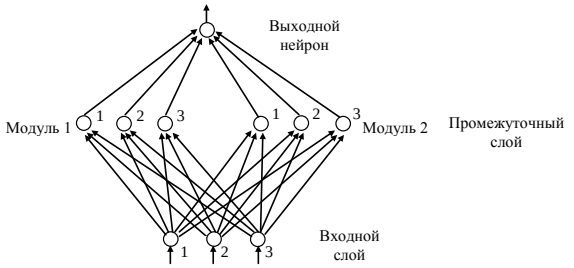


Рис. 1. Архитектура модели для случая $n = 3$, $m = 2$

промежуточного слоя подают сигнал на выходной нейрон. Связи между входным и промежуточным слоями модифицируются по мере предъявления и запоминания входных последовательностей. В начальном состоянии эти связи равны 0. В процессе обучения связи принимают целочисленные значения, которые монотонно растут. Связи модифицируются только в том случае, если входная последовательность идентифицирована как новая (не предъявлявшаяся ранее). Связи от нейронов промежуточного слоя к выходному нейрону постоянны и равны 1.

Работа модели

Функционирование модели разбито на три этапа. На первом этапе сеть отвечает на входную последовательность генерацией определенного типа активности нейронов. В этот период в дискретные моменты времени $t = 1, 2, \ldots, m$ на нейроны входного слоя подаются внешние сигналы. В каждый момент времени сигнал приходит лишь на один из нейронов. Входные последовательности задаются в виде последовательности номеров нейронов $s_1, s_2, \ldots, s_m$, где $s_t = \{1, 2, \ldots, n\}$ ($t = 1, \ldots, m$). Эта последовательность означает, что на нейрон входного слоя с номером s_t приходит сигнал 1 в момент времени t. Активность, возникающая в нейронах входного слоя, с помощью связей передается в промежуточный и затем в выходной слой.

На втором этапе происходит детекция известности. Последовательность распознается как известная, если выходной нейрон генерирует сигнал 1. В случае, когда выходной нейрон генерирует сигнал 0, последовательность детектируется как новая.

На третьем этапе, если входная последовательность идентифицируется как новая, происходит модификация связей между входным и промежуточным слоями. При предъявлении каждой последовательности отсчет времени начинается заново с 0.

Правила функционирования нейронов

Нейроны входного слоя являются беспороговыми сумматорами. Они суммируют все приходящие на них сигналы за период времени от 1 до t. Перед подачей входной последовательности, т. е. в момент времени 0, все потенциалы входных нейронов обнуляются: $V_i^1(0) = 0$ ($i = 1, \ldots, n$). Далее эти потенциалы модифицируются в соответствии со следующей формулой:

$$V_i^1(t) = \begin{cases} V_i^1(t-1) + 1, & i = s_t, \\ V_i^1(t-1), & i \neq s_t, \end{cases} \quad t = 1, \ldots, m,\ i = 1, \ldots, n.$$

Например, если входная последовательность равна (1, 2, 1), то в моменты времени 0, 1, 2, 3 выходные сигналы первых двух нейронов входного слоя будут соответственно (0, 0), (1, 0), (1, 1) и (2, 1).

Сумма всех сигналов, генерируемых нейронами входного слоя в дискретный момент времени t, равна t. Максимальное значение этой суммы достигается в последний момент предъявления элементов последовательности и равно m.

Нейроны промежуточного и выходного слоев бинарные, с порогом равным m, т. е. их выходные сигналы равны 0, если суммарный входной сигнал, приходящий на них от входных нейронов, меньше m, и 1 в противном случае.

При подаче на нейрон промежуточного слоя входных сигналов выходной сигнал формируется в соответствии со следующей формулой:

$$V_{jk}^2(t) = \begin{cases} \theta\left(\sum_{i=1}^{n} \min(V_i^1(t), \lambda_{ijk}) - m \right), & j = s_k,\ k \leq t, \\ 0, & j \neq s_k \text{ или } k > t, \end{cases}$$

$$k = 1, \ldots, m,\ \ j = 1, \ldots, n,$$

где $\theta(x)$ – функция Хевисайда ($\theta(x) = 0$ при $x < 0$, $\theta(x) = 1$ при $x \geq 0$); V_{jk}^2 – выходной сигнал, генерируемый j-м нейроном k-го модуля промежуточного слоя в момент t; $V_i^1(t)$ – сигнал, поступающий на нейроны промежуточного слоя от i-го нейрона входного слоя в момент времени t; λ_{ijk} – вес связи, приходящей на j-й нейрон модуля k промежуточного слоя от i-го нейрона входного слоя. Таким образом, ненулевой сигнал в модуле k может генерировать только нейрон s_k. Выходной сигнал нейрона s_k модуля k до момента m равен 0. В момент m, когда предъявление последовательности заканчивается, он равен 0 или 1. Значение 1 имеет место в том случае, если последовательность известная или ошибочно детектируется данным модулем как известная. Согласно приведенной формуле, сигналы, поступающие на нейрон промежуточного слоя, проходят через два порога: один порог ограничивает синаптическую передачу, а второй порог задает преобразование суммарного сигнала в выходной сигнал. Из приведенной формулы следует, что для того, чтобы нейрон j модуля k в промежуточном слое сработал (сгенерировал единичный выходной сигнал), необходимо, чтобы для всех $i = 1, \ldots, n$ имело место $V_i^1(m) \leq \lambda_{ijk}$.

Нейрон выходного слоя преобразует входные сигналы в выходные по следующей формуле:

$$V_{\text{out}}^3(t) = \theta\left(\sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} V_{jk}^2(t) - m \right) = \theta\left(\sum_{k=1}^{m} V_{s_k k}^2 - m \right),$$

где $V_{jk}^2(t)$ – входной сигнал, приходящий в момент времени t на выходной нейрон от j-го нейро-

на k-го модуля промежуточного слоя. Таким образом, для того чтобы в ответ на входную последовательность s_1, s_2, …, s_m выходной нейрон сработал (т. е. сгенерировал выходной сигнал, равный 1), нужно, чтобы в момент времени m сработали нейроны s_1 в модуле 1, s_2 в модуле 2, …, s_m в модуле m. До момента m выходной нейрон генерирует нулевой сигнал, поскольку до этого момента сумма входных сигналов на выходной нейрон меньше, чем m.

Модификация связей

До начала запоминания последовательностей силы всех связей между входным и промежуточным слоями устанавливаются равными 0. Если последовательность детектируется как новая, то связи между входным слоем и промежуточным слоем модифицируются в момент окончания предъявления всей последовательности. Модификации подвергаются только связи от входного слоя к нейронам всех модулей промежуточного слоя. Новая величина связи $\lambda_{ijk}^{\text{new}}$ вычисляется по формуле

$$\lambda_{ijk}^{\text{new}} = \begin{cases} \max(V_i^1(m), \lambda_{ijk}^{\text{old}}), & j = s_k, \\ \lambda_{ijk}^{\text{old}}, & j \neq s_k, \end{cases}$$

$$i = 1, ..., n, \quad j = 1, ..., n, \quad k = 1, ..., m,$$

где $V_i^1(m)$ – сигнал, поступающий на нейроны промежуточного слоя от i-го нейрона входного слоя после предъявления всей входной последовательности; $\lambda_{ijk}^{\text{old}}$ – текущая величина связи.

Указанная модификация связей гарантирует, что если какая-то входная последовательность предъявлена повторно, то при окончании второго предъявления в каждом модуле промежуточного слоя будет один активный нейрон и, следовательно, эта последовательность будет идентифицирована как известная. Более того, поскольку связи между входным и промежуточным слоями могут только расти, последовательность, которая однажды была идентифицирована как известная, в дальнейшем при любом предъявлении также будет идентифицирована как известная.

Оценка емкости памяти при детекции известности

Для определения емкости памяти при детекции известности на вход сети подавались различные случайные последовательности с независимыми компонентами, равномерно распределенными в диапазоне от 1 до n. Предъявление последовательностей продолжалось до тех пор, пока не возникала ошибка детекции известности, т. е. новая последовательность идентифицировалась как известная. Емкость сети определялась как число последовательностей, детекция известности которых проходила безошибочно. Средняя емкость C_{avr} определялась как среднее значение емкости, полученное при 100-кратном повторении вычисления емкости для разных наборов последовательностей. Данные о средней емкости C_{avr} при разреженном кодировании ($m << n$), полученные в результате симуляции для различных параметров модели, приведены на рис. 2.

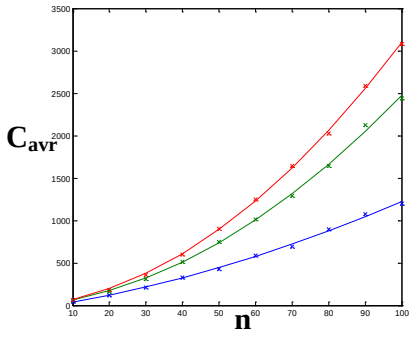


Рис. 2. Графики зависимости средней емкости от размера входного слоя (аппроксимация квадратичными полиномами). Нижняя кривая m = 3; промежуточная кривая m = 4; верхняя кривая m = 5

Приближение значений C_{avr} квадратичными полиномами дало следующие результаты:

$y_1 = 0{,}0601\, x^2 + 6{,}5816\, x - 32{,}6615;$

$y_2 = 0{,}2\, x^2 + 4{,}8318\, x - 1{,}8075;$

$y_3 = 0{,}2612\, x^2 + 4{,}9592\, x - 5{,}145.$

Удельная емкость в расчете на один модифицируемый синапс по порядку равна 0,06 : 3 = 0,02 для m = 3; 0,2 : 4 = 0,05 для m = 4; 0,26 : 5 = 0,0512 для m = 5. В последних двух случаях удельная емкость более чем в два раза превосходит удельную емкость 0,023, полученную для модели детекции известности хопфилдовского типа [18].

Заключение

Рассмотренная модель детекции известности построена из простейших пороговых элементов и обучается с помощью простой процедуры «снизу вверх». Тем не менее, модель демонстрирует большую емкость памяти. Для сети из 100 входных нейронов при запоминании последовательностей чисел из пяти членов емкость памяти (среднее число безошибочно запоминаемых последовательностей) превосходит 3000 последовательностей при общем числе нейронов в сети 601. Существенно, что детекция известности происходит в момент окончания предъявления последовательности с помощью параллельной процедуры, не требуя просмотра списка запомненных последовательностей.

Модель может быть естественным образом преобразована для запоминания бинарных паттернов. В этом случае во входном слое одновременно активируются все нейроны с номерами, соответствующими положению 1 во входном паттерне. Отличие в функционировании такой модели будет состоять в том, что на выходе нейронов входного слоя могут быть только сигналы 0 или 1, поскольку при стационарном паттерне одни и те же номера входных нейронов не могут повторяться.

Следует иметь в виду, что если кодирование последовательностей не разреженное, то число связей в такой сети может достигать порядка n^3.

Это на порядок больше, чем в других моделях детекции новизны, и может существенно снизить преимущества данной модели.

Если понизить порог срабатывания нейронов в промежуточном слое (в текущем варианте модели он равен m), то можно получить детекцию известности всех подпоследовательностей меньшей длины, чем последовательности, которые использовались при обучении. Понижение порога приведет к тому, что известными окажутся также последовательности, которые не в точности совпадают с обучающими последовательностями. Таким образом можно реализовать не точное, а ассоциативное запоминание и вспоминание.

В рассмотренной модели не была предусмотрена возможность «забывания». Поэтому любая предъявлявшаяся ранее последовательность будет гарантированно распознаваться как известная. Ошибки могут быть связаны только с тем, что новая последовательность может идентифицироваться как известная, если «память» нейронной сети «перегружена». Забывание в модель может быть внесено путем введения вероятностной процедуры элиминации ненулевых связей, т. е. когда ненулевая по силе связь между входным и промежуточным слоями с некоторой вероятностью (зависящей от времени) переводится в нулевое состояние. Введение забывания приведет к появлению ошибок, когда известная последовательность детектируется как новая.

Экспериментальные данные для распознавания известности нередко получаются путем предъявления испытуемому не одного примера, а пары примеров, в которой один из объектов уже предъявлялся ранее, а другой новый. Испытуемый должен определить, какой из объектов известный. Эта экспериментальная парадигма может быть реализована в результате небольшой модификации имеющейся модели. Пусть в ответ на первый пример на выходной элемент приходит сигнал I_1, а в ответ на второй пример – сигнал I_2. Если $I_1 > I_2$, тогда принимается решение, что первый пример является известным, если $I_1 < I_2$, тогда принимается решение, что второй пример является известным, если же $I_1 = I_2$, тогда решение принимается вероятностным способом.

Литература

1. *Ameen-Ali K.E., Easton A., Eacott M.J.* Moving beyond standard procedures to assess spontaneous recognition memory // Neurosci. Biobehav. Rev. 2015. V. 53. P. 37–51.

2. *Yonelinas A.P.* The nature of recollection and familiarity : a review of 30 years of research // J. Memory and Language. 2002. V. 46. P. 441–517.

3. *Miller G.A.* The magical number seven, plus or minus two. Some limits on our capacity for processing information // Psychol. Rev. 1956. V. 63. P. 81–97.

4. *Standing L.* Perception and memory for pictures: Single trial learning of 2500 visual stimuli // Plychol. Sci. 1970. V. 19. P. 73–74.

5. *Standing L.* Learning 10,000 pictures // Quat. J. Exp. Psychol. 1973. V. 25. P. 207–222.

6. *Squire L.R., Wixted J.T., Clark R.E.* Recognition memory and the medial temporal lobe: a new perspective // Nature Rev. Neurosci. 2007. V. 8. P. 872–883.

7. *Wixted J.T., Squire L.R.* The medial temporal lobe and the attributes of memory // Trends Cogn. Sci. 2011. V. 15. P. 210–217.

8. *Rutishauser U., Schuman E.M., Mamelak A.N.* Activity of human hippocampal and amygdala neurons during retrieval of declarative memories // Proc. Natl. Acad. Sci. (USA). 2008. V. 105. P. 329–334.

9. *Diana R.A., Reder L.M., Arndt J., Park H.* Models of recognition: A review of arguments in favor of a dual-process account // Psychon. Bull. Rev. 2006. V. 13. P. 1–21.

10. *Aggleton J.P., Vann S.D., Denby C. [et al.]* Sparing of the familiarity component of recognition memory in a patient with hippocampal pathology // Neuropsychologia. 2005. V. 43. P. 1810–1823.

11. *Eichenbaum H., Yonelinas A.R., Ranganath C.* The medial temporal lobe and recognition memory // Annu. Rev. Neurosci. 2007. V. 30. P. 123–152.

12. *Bowles B., Crupi C., Pigott S. [et al.]* Double dissociation of selective recollection and familiarity impairments following two different surgical treatments for temporal-lobe epilepsy // Neuropsychologia. 2010. V. 48. P. 2640–2647.

13. *Montaldi D., Mayes A.R.* The role of recollection and familiarity in the functional differentiation of the medial temporal lobes // Hippocampus. 2010. V. 20. P. 1291–1314.

14. *Merkow M.W., Burke J.F., Kahanac M.J.* The human hippocampus contributes to both the recollection and familiarity components of recognition memory // Proc. Natl. Acad. Sci. (USA). 2015. V. 112. P. 14378–14383.

15. *Brandt K.R., Eysenck M.W., Nielsen M.K., von Oertzen T.J.* Selective lesion to the entorhinal cortex leads to an impairment in familiarity but not recollection // Brain and Cognition. 2016. V. 104. P. 82–92.

16. *Hopfield J.J.* Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // Proc. Natl. Acad. Sci. (USA). 1982. V. 79. P. 2554–2558.

17. *Amit D.J.* Modeling brain function. Cambridge : Cambridge University Press, 1989.

18. *Bogacz R., Brown M.W.* The restricted influence of the sparseness of coding on the capacity of the familiarity discrimination networks // Network. 2002. V. 13. P. 457–485.

Фазовая синхронизация между медленными колебаниями потенциалов головного мозга и процессом дыхания

А.С. Караваев, Е.И. Боровкова, Б.П. Безручко

Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского
Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Первые упоминания о наблюдении устойчивых медленных колебаний электрических потенциалов головного мозга (ритмов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) с характерным периодом более 1 секунды) встречаются уже в работах изобретателя электроэнцефалографии Ханса Бергера [1]. Однако на протяжении многих лет при анализе ЭЭГ основное внимание привлекал анализ более высокочастотных ритмов: тета (4–8 Гц), альфа (8–12 Гц), бета (12–31 Гц) и др. [2]. Вместе с тем целый ряд исследователей отмечает важность изучения медленных колебаний потенциалов ЭЭГ с частотой около 0,1 Гц и ниже [3, 4]. Данное исследование концентрируется на исследовании медленных колебаний потенциалов ЭЭГ с частотой около 0,1 Гц. Такие медленные колебания относят к дельта-диапазону [2] либо выделяют в отдельный диапазон, ограничивая дельта-диапазон полосой 0,5–4 Гц [5]. В ряде работ показана важность исследования медленных колебаний для развития фундаментальных представлений об устройстве и динамике автономной нервной системы [3, 6]. Медленные колебания потенциалов ЭЭГ изучают для диагностики нарушений функционирования головного мозга [7–11], исследования поведенческих процессов [5, 13–15].

В ряде работ делался вывод о том, что медленные колебания потенциалов ЭЭГ и колебания в дельта-диапазоне не являются непосредственным следствием активности церебрального кортекса, а являются скорее проявлением активности автономной нервной системы [3, 4]. Известные работы указывают на связь медленных колебаний потенциалов ЭЭГ с регуляцией ритма сердца, артериального давления, дыхания и других процессов [3, 16, 17]. Отмечался сложный механизм формирования медленных колебаний потенциалов ЭЭГ, связанный с регуляторной деятельностью на разных уровнях центральной и вегетативной нервной системы [3, 5, 6, 16]. Князев утверждал, что устойчивые медленные колебания потенциалов ЭЭГ должны синхронизироваться с процессами вегетативной регуляции [5].

Несмотря на важность проблемы, значительно продвинуться в исследованиях медленных колебаний электрических потенциалов, и в частности медленных колебаний ЭЭГ, до последнего времени не удавалось [11]. В частности, практически отсутствуют исследования медленных колебаний ЭЭГ у бодрствующих людей, так как в этом случае активация различных областей мозга затрудняет линейный корреляционный и спектральный анализ низкочастотных составляющих ЭЭГ, имеющих, как правило, невысокие амплитуды [5]. Наиболее существенно продвинуться в исследованиях удалось в работе [6] благодаря применению нелинейных методов анализа многоканальных записей анестезированных собак. Авторами была диагностирована фазовая синхронизация между систолическим артериальным давлением, активностью эфферентного почечного симпатического нерва и колебаниями в структурах ствола мозга. Вместе с тем использование лишь методов пассивного наблюдения сигналов и отсутствие статистического анализа результатов ограничило возможности этих исследователей [6, 17].

Целью данного исследования являлось изучение особенностей взаимодействия медленных колебаний потенциалов ЭЭГ, процесса дыхания и сигналов контуров автономной регуляции кровообращения у бодрствующих здоровых людей в ходе специальных активных экспериментов с помощью чувствительных нелинейных методов анализа фазовой динамики исследуемых систем.

В исследовании принимали участие 20 испытуемых, у которых одновременно регистрировались сигналы ЭЭГ, электрокардиограммы (ЭКГ) и дыхания.

С испытуемыми были проведены две серии активных экспериментов с воздействием на организм сигналом дыхания, частота которого изменялась по определенному закону. В активных экспериментах специальное программное обеспечение генерировало звуковые сигналы, а испытуемый должен был осуществлять вдох после каждого звукового сигнала. Глубина вдоха и процесс выдоха не контролировались. Первая серия активных экспериментов подразумевала воздействие дыханием, частота которого нарастала во времени от 0,05 до 0,25 Гц в течение 30 минут по линейному закону. Во второй серии экспериментов частота звуковых сигналов, задающих моменты вдоха, изменялась ступенчато. Последовательно регистрировались три временных интервала длительностью по 7 минут с частотой дыхания 0,08; 0,12 и 0,21 Гц.

Для неинвазивной регистрации ЭЭГ использовалась стандартная схема «10–20» и электроды Ag/AgCl. Одновременно с каналами ЭЭГ осуществлялась регистрация I стандартного отведения ЭКГ и сигнала пальцевой ФПГ датчиком отраженного света в ИК-диапазоне частот (960 нм), а также сигнала дыхания абдоминальным тензорезисторным датчиком. Регистрация осуществлялась стандартным сертифицированным прибором Encephalan-EEGR-19/26 («Медиком MTD», Рос-

сия) с разрядностью квантования 16 бит, частотой дискретизации 250 выборок в секунду на канал. Полоса пропускания для каналов ЭЭГ составляла 0,0016–80 Гц, для канала ЭКГ – 0,003–80 Гц, для канала ФПГ – 0,003–80 Гц, для сигнала дыхания – 0,003–80 Гц. Все записи осуществлялись в положении лежа, с закрытыми глазами, не менее чем через 2 часа после еды в тихом затемненном помещении.

Ранее нами была продемонстрирована важность изучения взаимодействия элементов автономной регуляции кровообращения [18–20]. В работах [18, 19] было показано, что ритмы контуров регуляции частоты сердечных сокращений и контура регуляции тонуса артериальных сосудов, имеющие собственные частоты колебаний около 0,1 Гц, могут быть захвачены сигналом дыхания. В этих экспериментах частота вдохов линейно нарастала от 0,05 до 0,25 Гц в течение 30 минут, следуя за звуковыми сигналами, которые генерировало специальное программное обеспечение. В представленной работе также были проведены активные эксперименты с дыханием, частота которого изменялась по известному закону. В них изучалась синхронизация дыханием медленных колебаний потенциалов ЭЭГ.

Для повышения достоверности результатов анализа мы одновременно использовали несколько методов диагностики синхронизованности. В первую очередь, захват f частот медленных колебаний ЭЭГ сигналом дыхания с частотой f_r диагностировался с помощью оценки соответствующей зависимости $f(f_r)$. Основная частота медленных колебаний определялась на основе расчета непрерывного вейвлетного преобразования [21]. Во-вторых, мы использовали метод, основанный на анализе мгновенной разности фаз колебаний $\Delta\varphi$, выделенной с помощью вейвлета Морле, масштабный коэффициент которого изменяется в соответствии с мгновенной частотой априорно известного воздействующего сигнала [20].

В-третьих, по экспериментальным данным дополнительно были рассчитаны и проанализированы синхрограммы ψ [22], являющиеся удобным инструментом для визуального выявления захвата фаз. Выделенные таким образом в достаточно широкой полосе частот мгновенные фазы использовались также для расчета в скользящих окнах коэффициента фазовой когерентности ρ [23].

Для всех испытуемых был проведен анализ синхронизации между процессом дыхания, а также сигналами отведений ЭЭГ и сигналом вариабельности сердечного ритма (кардиоинтервалограммы (КИГ)) с помощью описанных выше методов. Все анализируемые сигналы предварительно фильтровались в полосе [0,05; 0,25] Гц.

Оказалось, что в типичном случае удается выявить длительные участки захвата дыханием частот и фаз медленных колебаний ЭЭГ (рис. 1). Причем разнородные методы анализа, использующие разные способы введения фаз, дают близкие результаты определения границ интервала захвата частот порядка 1:1 (на рис. 1 примерно от 300 с до 600 с). Коэффициент ρ резко возрастает внутри интервала синхронного поведения, оставаясь близким к 1 и значимым (рис. 1, *а*). Разность мгновенных фаз $\Delta\varphi$ демонстрирует изменение на π радиан (рис. 1, *б*). Такое поведение соответствует динамике внутри языка Арнольда между его границами [24]. Зависимость основной частоты в спектре от частоты дыхания демонстрирует классическую картину захвата частоты неавтономного генератора внешним сигналом переменной частоты, характерную, например, для радиофизических автогенераторов (рис. 1, *в*) [20, 24]. Видно, что внутри интервала синхронизации синхрограмма также демонстрирует поведение, характерное для синхронизации неавтономного генератора (рис. 1, *г*).

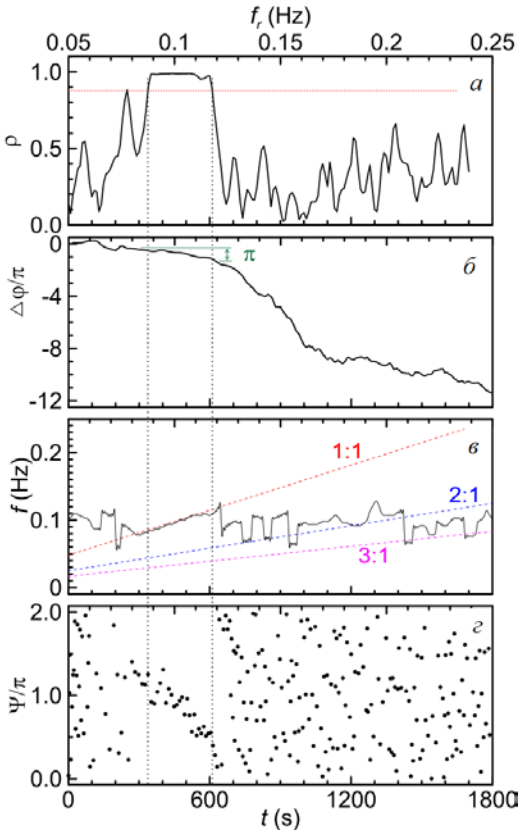


Рис. 1. Результаты анализа захвата фаз и частот колебаний медленных колебаний отведения O1 испытуемого #5 сигналом дыхания с линейно нарастающей во времени частотой: *а* – коэффициент фазовой когерентности (горизонтальной точечной линией отмечен 95% уровень значимости); *б* – разность мгновенных фаз колебаний, выделенная с помощью вейвлета Морле (отмечен участок, соответствующий примерно линейному падению разности фаз на π радиан); *в* – зависимость основной частоты в спектре медленных колебаний отведения O1 ЭЭГ от частоты дыхания f_r; *г* – синхрограмма. Вертикальные пунктирные линии обозначают диагностированный интервал синхронизации вблизи собственной частоты колебаний, где ρ остается выше уровня значимости

В ходе количественного анализа проведено сопоставление длительностей интервалов захвата фаз порядка 1:1, на которых значения коэффициента ρ были статистически значимы. Наиболее длительный интервал синхронизации был диагно-

стирован у пациента #8 в отведении O1. Он составил 674 секунды. Анализ ансамбля экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что наиболее длительные интервалы синхронизации наблюдаются в затылочных отведениях. В других областях скальпа синхронизация выражена хуже или совсем не выявляется. По всей видимости, такие результаты обусловлены тем, что существенный вклад в формирование сигналов затылочных отведений ЭЭГ вносят центры вегетативной регуляции кровообращения, локализованные в стволе мозга [3, 5, 6]. Средняя длительность участков синхронизации по всем отведениям ЭЭГ всех испытуемых составила 177 с ± 127 с (среднее плюс-минус стандартное отклонение).

При этом 0,1-Гц составляющая сигналов КИГ синхронизуется в более широких интервалах. Например, для испытуемого #5 синхронизация наблюдается на интервале 150–1000 секунд, а для испытуемого #8 – 100–1150 секунд. Средняя длительность участков синхронизации 0,1-Гц ритмов КИГ испытуемых составила 772 с ± 209 с (среднее плюс-минус стандартное отклонение). Это значимо превышает длительность интервалов захвата медленных колебаний в ЭЭГ и может свидетельствовать о том, что эффективная сила воздействия дыхания на контур регуляции, обеспечивающий регуляцию сердечного ритма с частотой около 0,1 Гц, сильнее, чем на процессы, обеспечивающие формирование медленных колебаний ЭЭГ.

В ходе второй серии активных экспериментов были сделаны записи сигналов сердечно-сосудистой системы и отведений ЭЭГ при ступенчато изменяющейся частоте дыхания.

Анализ сигналов отведения T5 испытуемого #5 говорит о наличии захвата процессом дыхания мгновенной фазы и частоты медленных колебаний сигнала отведения T5 порядка 1:1 на первом участке и порядка 2:1 на третьем, о чем свидетельствуют и коэффициент ρ (рис. 2, *а*) и синхрограмма (рис. 2, *б*). Качественно похожее поведение наблюдается и в других отведениях: O1, P3, Pz. Вместе с тем на одних и тех же временных интервалах абсолютные значения разностей фаз в режиме фазовой синхронизации различаются. Такие результаты свидетельствуют, что проекции активности различных структур мозга на ЭЭГ-электродах соответствуют нескольким осцилляторам с близкими частотами, находящимися под воздействием сигнала дыхания. В пользу интерпретации медленных колебаний в ЭЭГ, как результата деятельности нескольких автоколебательных процессов, говорят также выводы о том, что в разных отведениях одновременно могут наблюдаться режимы синхронизации разных порядков, формируя локализованные пространственно локализованные паттерны.

В целом результаты диагностики связанности указывают, что нелинейные методы, основанные на анализе фазовой динамики, позволяют надежно выявить взаимодействие низкочастотных составляющих КИГ, дыхания и ЭЭГ. Это является дополнительным аргументом в пользу гипотезы о существенно нелинейном характере взаимодействия указанных процессов.

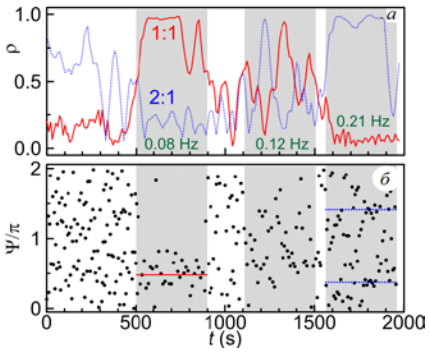


Рис. 2. Результаты анализа сигнала отведения T5 ЭЭГ испытуемого #5 в активных экспериментах со ступенчато изменяющейся частотой дыхания (серыми полосами отмечены участки, на которых испытуемый осуществлял вдохи с частотой, задаваемой звуковыми сигналами; на временных интервалах, отмеченных белыми полосами, дыхание было спонтанным): *а* – коэффициент фазовой когерентности, рассчитанный для порядков 1:1 – сплошная линия и 2:1 – точечная линия; *б* – синхрограмма (сплошная линия – участок синхронизации 1:1 на первом участке активного эксперимента, точечные линии – скопления точек синхрограммы, соответствующих синхронизации порядка 2:1 на третьем интервале активного эксперимента)

При изучении сложных систем биологической природы активный эксперимент с контролируемым воздействием является одним из наиболее достоверных способов выявления взаимодействия элементов такой системы [24]. По результатам проведенных исследований с синхронизацией в активном эксперименте можно утверждать, что выявлено сильное (приводящее к синхронизации) взаимодействие между дыханием и медленными колебаниями в ЭЭГ, а также спектральными составляющими с частотами около 0,1 Гц в КИГ. Причем анализ медленных колебаний свидетельствует о наличии в ЭЭГ активности нескольких автоколебательных систем, имеющих близкие к 0,1 Гц, но неидентичные частоты колебаний. Анализ направленных связей при спонтанном дыхании позволил уточнить преимущественные направления связей и предложить структурную схему взаимодействия процесса дыхания, медленных колебаний ЭЭГ и систем регуляции кровообращения, активность которых проявляется в сигнале КИГ. Результаты говорят в пользу того, что взаимодействие рассматриваемых процессов носит принципиально нелинейный характер и организовано через сложную структуру связей, включающих существенные временные запаздывания порядка нескольких секунд.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 19-12-00201.

Литература

1. *Millett D.* Hans Berger: from psychic energy to the EEG // Perspectives in Biology and Medicine. 2001. V. 44. P. 522–542.

2. *Nuwer M.R., Lehmann D., da Silva F.L., Matsuoka S., Sutherling W., Vibert J.F.* IFCN guidelines for topographic and frequency analysis of EEGs and EPs // Recom-

mendations for the practice of clinical neurophysiology: guidelines of the International Federation of Clinical Physiology / eds. G. Deuschl and A. Eisen. Elsevier Science, 1999.

3. *Aladjalova N.A.* Psychophysiological aspects infraslow rhythmic brain activity. Moscow : Nauka, 1979. 214 p.

4. *Lorincz M.L., Geall F., Bao Y., Crunelli V., Hughes S.W.* ATP-Dependent Infra-Slow (<0.1 Hz) Oscillations in Thalamic Networks // PLoS ONE. 2009. V. 4, iss. 2. P. e4447.

5. *Knyazev G.G.* EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes // Neuroscience and Biobehavioral Reviews. 2012. V. 36, iss. 1. P. 677–695.

6. *Vandenhouten R., Lambertz M., Langhorst P., Grebe R.* Nonstationary time-series analysis applied to investigation of brainstem system dynamics // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2000. V. 47, iss. 6. P. 729–737.

7. *Gloor P., Ball G., Schaul N.* Brain lesions that produce delta waves in the EEG // Neurology. 1977. V. 27, iss. 4. P. 326–333.

8. *Accolla E.A., Kaplan P.W., Maeder-Ingvar M.* Clinical correlates of frontal intermittent rhythmic delta activity (FIRDA) // Clinical Neurophysiology. 2011. V. 122, iss. 1. P. 27–31.

9. *Spironelli C., Angrilli A.* EEG delta band as a marker of brain damage in aphasic patients after recovery of language // Neuropsychologia. 2009. V. 47, iss. 4. P. 988–994.

10. *Feddersen B., Ausserer H., Neupane P.* Right temporal cerebral dysfunction heralds symptoms of acute mountain sickness // Journal of Neurology. 2007. V. 254, iss. 3. P. 359–363.

11. *Stuart W.H., Magor L.L., Parri H.R., Crunelli V.* Infra-slow (<0.1 Hz) oscillations in thalamic relay nuclei: basic mechanisms and significance to health and disease states // Progress in Brain Research. 2011. V. 193. P. 145–162.

12. *Barry R.J., Clarke A.R., Johnstone S.J.* A review of electrophysiology in attention–deficit/hyperactivity disorder: I. Qualitative and quantitative electroencephalography // Clinical Neurophysiology. 2003. V. 114. P. 171–183.

13. *Chabot R.J., di Michele F., Prichep L., John E.R.* The clinical role of computerized EEG in the evaluation and treatment of learning and attention disorders in children and adolescents // J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci. 2001. V. 13, iss. 2. P. 171–186.

14. *Penolazzi B., Spironelli C., Angrilli A.* Delta EEG activity as a marker of dysfunctional linguistic processing in developmental dyslexia // Psychophysiology. 2008. V. 45, iss. 6. P. 1025–1033.

15. *Naacher V., Ledberg A., Deco G., Romo R.* Coherent delta-band oscillations between cortical areas correlate with decision making // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2013. V. 110, iss. 37. P. 15085–15090.

16. *Aladjalova N.A.* Infra–slow rhythmic oscillations of the steady potential of the cerebral cortex // Nature. 1957. V. 179. P. 957–959.

17. *Lambertz M., Langhorst P.* Simultaneous changes of rhythmic organization in brainstem neurons, respiration, cardiovascular system and EEG between 0.05 Hz and 0.5 Hz // Journal of the Autonomic Nervous System. 1998. V. 68, iss 1/2. P. 58–77.

18. *Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Gridnev V.I., Bodrov M.B., Bespyatov A.B.* Synchronization between main rhythmic processes in the human cardiovascular system // Physical Review E. 2003. V. 68, № 4. P. 419131–4191310.

19. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Ponomarenko V.I., Prokhorov M.D.* Detecting synchronization of self-sustained oscillators by external driving with varying frequency // PRE. 2006. V. 73, № 2. P. 026208.

20. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Makarov V.A., Pavlov A.N., Sitnikova E.Yu.* Wavelets in Neuroscience. Heidelberg ; NewYork ; Dordrecht ; London : Springer, 2015. 318 p.

21. *Blekhman, I.I.* Synchronization in Science and Technology. ASME Press, 1988.

22. *Schafer C., Rosenblum M.G., Abel H.H., Kurths J.* Synchronization in the human cardiorespiratory system // Physical Review E. 1999. V. 60. P. 857–870.

23. *Mormann F. Lehnertz K., David P., Elger C.E.* Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients // Physica D: Nonlinear Phenomena. 2000. V. 144, iss. 3/4. P. 358–369.

24. *Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J.* Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge University Press, 2001.

Модель волнового транспорта в сосудистой системе с учетом локальной активной регуляции

Б.Н. Клочков

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, email: klochkovbn@gmail.com

В ряде работ описаны актуальные направления развития волновых исследований биологических тканей, в том числе и сосудов, с учетом их функциональной и структурной организации [1–5]. Особенно существенны активные волновые процессы с участием взаимодействующих белков в биологических системах, когда реализуются механические движения за счет биохимических реакций. В стенку различных полых биообъектов (органы, сосуды) могут входить гладкомышечные волокна (миоциты) или немышечные клеточные аналоги, за счет активности которых происходит динамическое изменение формы просвета органа и, как следствие, регуляция объема, тока биомассы, биожидкости, биогаза [6–13]. В этой стенке возникает дополнительное активное напряжение, зависящее от радиуса органа немонотонно (колоколообразно), тогда статическая характеристика «давление – радиус» может приобретать падающий участок. Представлена нелинейная модель волновых процессов в биосистемах с учетом такой локальной миогенной регуляции. Механизмы ее синхронизации связаны с собственной местной активацией мышечноподобных белковых структур, зависящей от геометрических и механических параметров. В этом случае возможно существование и распространение в органах перепадных автоволн просвета (волн сокращения-расширения) [14–18]. Решения модели призваны описывать и анализировать возможности активной перистальтической прокачки биоматериалов, в частности эффективность транспорта лимфы и крови. Рассматриваемые волновые механизмы важны для переноса биоматериалов в биосистемах различного уровня функционирования.

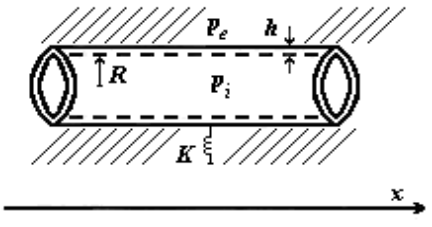


Рис. 1. Схема цилиндрического полого органа

Использованы методы математического моделирования биологических сплошных сред [19–24]. Построена эволюционная нелинейная математическая модель в частных производных активного вязкоупругого цилиндрического (трубчатого) полого органа (рис. 1). Параметры активного напряжения появляются из-за наличия в стенке слоя или слоев возбужденных клеток. Рассматриваются достаточно медленные процессы, использовано безынерционное приближение. Полый орган – тонкостенный, материал его стенки несжимаем. При этом перепад давления вдоль органа мал, мала скорость течения биожидкости. Основное уравнение имеет вид [21–24]

$$q\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+f(\varepsilon)-T\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial x^2}=0\,. \qquad (1)$$

Здесь основной переменной является деформация $\varepsilon = (R - R_0)/R_0$, причем $R(x, t)$ – текущий внутренний радиус, R_0 – недеформированный радиус. Время релаксации $q=\mu_l/\mu$, где μ – модуль сдвига материала стенки, μ_l – коэффициент вязкости материала стенки. Параметр натяжения органа $T=T_1R_0^{\,2}/(2\mu)$, где T_1 – коэффициент, включающий аддитивно продольное натяжение T_0 и упругий модуль μ. Нелинейная функция $f(\varepsilon)=-(A/2)\varepsilon+(\beta_2/4\mu)\varepsilon^2$, где $A = (\gamma_1 - 2\mu)/\mu$ – безразмерный линейный параметр, γ_1 – линейный параметр активного напряжения, β_2 – нелинейный квадратичный параметр (рис. 2). Ось x направлена вдоль органа, t – время. Данная модель может быть усложнена при помощи учета более тонких механизмов взаимодействия белковых структур и их возбуждения, а также дополнительных механических параметров и переменных.

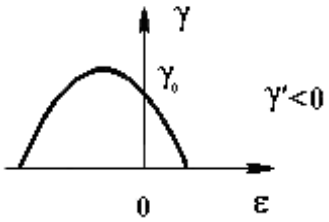


Рис. 2. Параболическая аппроксимация нелинейной функции активности $\gamma(\varepsilon) = f(\varepsilon)$

При выводе уравнения (1) использованы дополнительно к обычным напряжениям активные напряжения с соответствующими параметрами и модулями. В частности, добавляется активный модуль γ_1, который может менять знак параметра A в функции $f(\varepsilon)$, т. е. может менять знак модуля общей упругости. При этом возникает длинноволновая неустойчивость, ограничивающаяся нелинейностью $f(\varepsilon)$, и волна. В случае отсутствия активных напряжений $\gamma_1 = 0$ и уравнение (1) переходит в обычное уравнение для трубки из обычного вязкоупругого материала, не имеющее представленных решений и эффектов. Уравнение (1) специально представлено в таком общем универсальном каноническом виде, чтобы продемонстрировать фундаментальность рассматриваемого волно-

вого транспортного процесса в биососудах и органах. Более детальный вывод (1) опирается на подход, изложенный в источниках, которые можно проследить по ссылкам в списке литературы. Функция $f(\varepsilon)$ выбрана достаточной для аппроксимации экспериментальных данных и аналитического анализа решений. В [21] рассмотрена частная биофизическая постановка задачи и ее обоснование, обсуждаются конкретные экспериментальные данные и их графики, а также возможности их аппроксимации, описана линейная задача, неустойчивость и ее ограничение. Эффекты, связанные с влиянием динамики биожидкости внутри органа, в данной модели не рассматриваются. Вся динамика органа определяется только движением его стенки. Наличие жидкости не принципиально, представленная модель справедлива и в случае, когда сосуд или орган заполнен газом или воздухом, как, например, в легочных сосудах. Заметим, что для более сложной модели [22] дополнительно учитывались гидродинамические уравнения в гидравлическом приближении и было показано, что постоянство давления внутри сосуда – приемлемое приближение. Характерное гидродинамическое время существенно меньше, чем характерное время релаксации материала стенки, т. е. гидродинамика – быстрая, а вязкоупругая релаксация – медленная. Кроме этого, у лимфатических сосудов нет внешнего насоса, трансмуральное давление мало меняется вдоль сосуда [6, 13, 14, 22].

Рассмотрим данную модель активного трубчатого органа на основе нелинейного уравнения в частных производных (1). Исследуем нелинейный режим. Для стационарных волн решение зависит от автомодельной бегущей переменной, причем уравнение сводится к нелинейному обыкновенному уравнению. В этом случае решения выглядят следующим образом [25]:

$$\delta(y,\tau) = \frac{1}{\left(1 + D\mathrm{e}^{z}\right)^2}, \quad z = -\frac{5}{6}A\tau \pm y\sqrt{\frac{A}{6}} \qquad (2)$$

($A > 0$, волна сокращения),

$$\delta(y,\tau) = \frac{1 + 2D\mathrm{e}^{z}}{\left(1 + D\mathrm{e}^{z}\right)^2}, \quad z = -\frac{5}{6}A\tau \pm y\sqrt{-\frac{A}{6}} \qquad (3)$$

($A < 0$, волна восстановления),

$$t = \tau 2q, \quad x^2 = y^2 2T, \quad \delta = \varepsilon\beta_2/(2\mu A). \qquad (4)$$

Здесь введены безразмерные время τ, пространство y и функция $\delta(y,\tau)$, знаки (+) и (–) связаны с направлением движения волны, z – волновая переменная, D – постоянная, определяемая условиями задачи. Графически решения представлены на рис. 3. Для стационарных волн получены аналитические решения в виде перепадов радиуса (просвета) органа. Это связано с автоволновой природой неустойчивости на нелинейной стадии.

Безразмерные скорости автоволн равны $V = 5(\pm A/6)^{1/2}$. Выражения для размерной скорости V_r распространения геометрической автоволны и для размерной характерной ширины l_r ее фронта по пространственной координате x имеют следующий вид (их произведение не зависит от активности A):

$$V_r = \frac{5R_0}{2\theta_1}\sqrt{\frac{|A|}{6}}, \quad l_r = \frac{R_0}{\sqrt{|A|}}\sqrt{\frac{6T_1}{\mu}}, \quad V_r l_r = \frac{5R_0^2}{2\theta}, \qquad (5)$$

где $\theta = \mu_l / T_1$ и еще $\theta_1 = \mu_l / \sqrt{\mu T_1}$ – характерные времена пассивной релаксации радиуса.

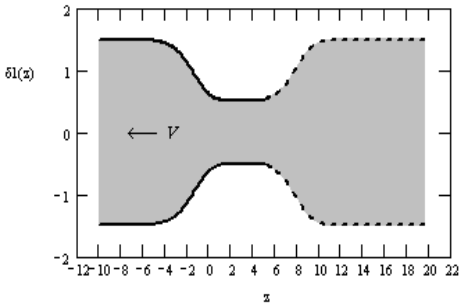


Рис. 3. Перепадные автоволны просвета цилиндрического органа в безразмерных переменных: фаза волнового сокращения (прокачки, $A > 0$) – сплошная кривая, фаза волновой релаксации (восстановления, $A < 0$) – пунктирная кривая, $\delta 1(z) = \delta(z) \pm 0{,}5$, $D = 2$

Отсюда следуют выражения для характерной скорости распространения волны V_0 и характерной ширины фронта волны l_0 (при $|A| \sim 1$), которые можно использовать для числовых оценок:

$$V_0 = \frac{5R_0}{\theta_1 2\sqrt{6}}, \quad l_0 = R_0\sqrt{\frac{6(\mu + T_0)}{\mu}}. \qquad (6)$$

Максимальная относительная величина (амплитуда) ε_m перепада радиуса R цилиндрического органа в автоволне определяется формулой

$$\varepsilon_m = \frac{R_0 - R_1}{R_0} = \frac{2\mu A}{\beta_2}, \quad \varepsilon_0 = \frac{2\mu}{\beta_2}. \qquad (7)$$

Здесь R_1 и R_0 – соответственно минимальный и недеформированный радиусы органа в волне. На рис. 4 представлены функциональные безразмерные зависимости скорости распространения волны $Vn = V_r / V_0$, ее ширины $Ln = l_r / l_0$ и амплитуды $En = \varepsilon_m / \varepsilon_0$ от безразмерной активности A. Отсюда видно, что скорость волны медленно увеличивается

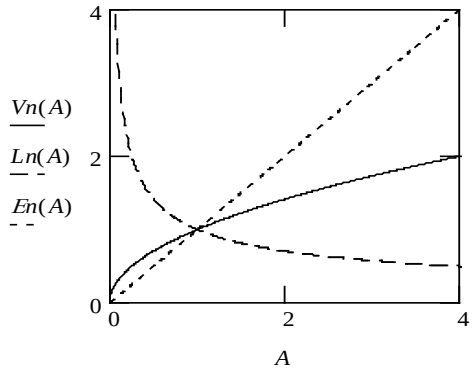


Рис. 4. Зависимость скорости (сплошная линия), ширины фронта (штрих) и амплитуды (пунктир) автоволны от активности

с ростом активности, а в то же время ее ширина медленно уменьшается. Одновременно с этим амплитуда (величина перепада) растет с усилением активности быстрее (линейно). Автоволновой режим, близкий к описанному стационарными формулами (2), (3), осуществляется в достаточно длинном органе, когда его длина L существенно больше характерной ширины фронта волны l_r ($L >> l_r$). Нестационарные процессы описываются численно. Найденное решение бегущей стационарной волны в виде перепада просвета органа подтверждается численными расчетами исходных уравнений в частных производных. На рис. 5 изображено периодическое временно*е* распространение данной автоволны.

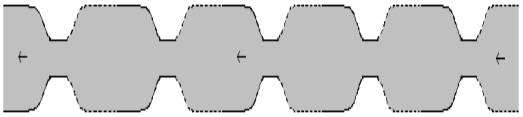


Рис. 5. Распространение во времени автоволны справа налево

При распространении такой автоволны вдоль органа его содержимое выдавливается этой волной (эффект нелинейного транспорта). Подсчитаем производительность Q_r такого активного насоса, вызванного распространяющейся механохимической автоволной сжатия органа. Она вычисляется при помощи уравнения неразрывности. Тогда получить численную оценку величины производительности насоса Q_r можно при помощи следующей формулы: $Q_r = \pi V_r (R_0^2 - R_1^2)$. Доля фракции инжекции может быть рассчитана как $E_f = (R_0{}^2 - R_1{}^2)/R_0{}^2$.

В экспериментах на лимфатических сосудах [14] представлены следующие значения рассматриваемых параметров (рис. 6): скорость распространения волны изменения диаметра (просвета) лимфососуда V_r = (4–5) мм/с, ширина фронта этой волны $l_r \sim 5R_0$ (R_0 = (0,2–1,5) мм), частота волновых сокращений (возбуждающие пейсмекеры располагаются вблизи клапанов) f_l = (4–6) мин$^{-1}$, фракция изгнания E_f = (45–65) %. При этом перепад давления вдоль лимфососуда мал, мала скорость течения лимфы, поскольку мало производство лимфы в организме, определяемое медленными фильтрационными и другими процессами [6, 7, 13, 14, 22].

Из представленных выражений (5) для значений R_0 = 1 мм, q = 0,2 с, A = 0,4, T_0 = μ получаем $V_r \approx$ 4,6 мм/с, $l_r \approx$ 5,5 мм. Отсюда с учетом R_1 = = 0,6 мм можно вычислить производительность такого активного насоса, вызванного распространяющейся автоволной сжатия, $Q_r \approx$ 9,2 мм^3/с (мг/с). Величина инжекции составляет E_f = 64 %. То есть волна может давать существенный прокачивающий эффект. Параметры автоволны достаточно близки наблюдаемым и измеряемым. При осуществлении транспорта диссипация энергии De на волновом перепаде вычисляется при помощи интегрирования по объему стенки сосуда v с учетом вязкости материала стенки μ_l и скорости изменения радиуса $\dot{R}$, а также дополнительных значений толщины стенки h = 0,1 мм и модулей упругости $\mu = 5 \cdot 10^3$ Н/м^2, $\beta_2 = \mu$ для оценки ее величины следующим образом:

$$De = -\int [2\mu_l (\dot{R})^2] dv = -0{,}04 \text{ [г·см}^4\text{/с}^3\text{]}. \qquad (8)$$

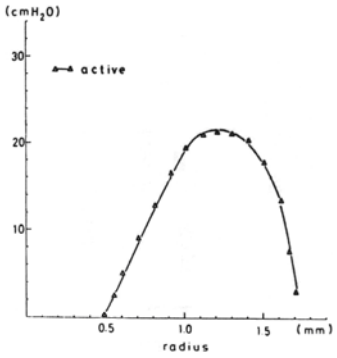


Рис. 6. Экспериментальная активная кривая из работы [14] для лимфатического сосуда, определяющая напряжение гладких мышц в зависимости от радиуса, $\gamma(R)$. Эту кривую достаточно аппроксимировать параболой рис. 2

В заключение отметим, что представленная нелинейная математическая модель является достаточно точным приближением, позволяющим описать существование и распространение механохимических перепадных активных волн сокращения и расширения. Данная обобщенная универсальная модель описывает полный цикл сокращения – восстановления сосуда или органа. Предложенный механизм данного активного движения способен осуществлять важную транспортную функцию биологических материалов в органах цилиндрического типа: прокачку и насосные перистальтические эффекты. В рамках данной модели удалось получить понятные наглядные решения и аналитические выражения для скорости распространения автоволны сжатия (восстановления) просвета органа, для ширины ее фронта и формы. Полученные с помощью формул их оценки близки к экспериментальным данным и наблюдениям в лимфососудах животных. Заметим также, что описанные волны с близкими и сопоставимыми параметрами экспериментально наблюдались на сердце небольшой морской асцидии [26]. С точки зрения биоакустики это важно для понимания конкретных волновых физиологических процессов [27].

Данные самоподдерживающиеся волны, возможно, могут также играть важную практическую роль и в некоторых других объектах, например в венах, в мочеточнике, в сердцах различной природы, в аксонном транспорте, в органах трубчатого типа с тонусом у живых организмов, хотя пока не всегда существуют соответствующие экспериментальные данные, наблюдения и указания. При этом форма активного органа в общем непринципиальна, для органов нецилиндрического типа

данный механизм может действовать аналогично. Принципиальным является наличие в стенке органа гладкомышечных волокон или немышечных аналогов в активном возбужденном состоянии за счет энергии, вырабатываемой биохимическими реакциями. При этом волна, которая дает насосный эффект, может быть четко выраженной или не явно выраженной. В настоящей работе представлен новый общий фундаментальный принцип перемещения биоматериалов в полых органах, как альтернативный механизм транспорта, который может быть приложен к конкретным сосудам, сердцам и другим объектам.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН (проект 0035–2014–0008).

Литература

1. *Руденко О.В., Сарвазян А.П.* Волновая анизотропия сдвиговой вязкости и упругости скелетной мышцы // Акустический журнал. 2014. Т. 60, № 6. С. 679–687.

2. *Руденко О.В., Сарвазян А.П.* Волновая биомеханика скелетной мышцы // Акустический журнал. 2006. Т. 52, № 6. С. 833–846.

3. *Sarvazyan A., Rudenko O., Aglyamov S., Emelianov S.* Muscle as a molecular machine for protecting joints and bones by absorbing mechanical impacts // Medical Hypotheses. 2014. V. 83, № 1. P. 6–10.

4. *Розанов В.В., Руденко В.О., Сысоев Н.Н.* Гемодинамика и нелинейная акустика: общие подходы и решения // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 4/5. С. 594–605.

5. *Руденко О.В.* Нелинейные волны: некоторые биомедицинские приложения // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 4. С. 374–383.

6. Физиология человека : в 4 т. / пер. с англ. ; под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. М. : Мир, 1985. Т. 1. 272 с.

7. Физиология кровообращения : физиология сосудистой системы. Л. : Наука, 1984. 656 с.

8. Физиология кровообращения : регуляция кровообращения. Л. : Наука, 1986. 640 с.

9. *Фолков Б., Нил Э.* Кровообращение. М. : Медицина, 1976. 464 с.

10. *Fung Y.C.* Biodynamics. Circulation. New York : Springer-Verlag, 1984. 404 p.

11. *Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У.* Механика кровообращения. М. : Мир, 1981. 624 с.

12. *Парашин В.Б., Иткин Г.П.* Биомеханика кровообращения : учеб. пособие / под ред. С.И. Щукина. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 224 с.

13. *Орлов Р.С., Борисов А.В., Борисова Р.П.* Лимфатические сосуды. Л. : Наука, 1983. 254 с.

14. *Ohhashi T., Azuma T., Sakaguchi M.* Active and passive mechanical characteristics of bovine mesenteric lymphatics // Amer. J. Physiol. 1980. V. 239. P. H88–H95.

15. *Hilton S.M.* A peripheral arterial conducting mechanism underlying dilation of the femoral artery and concerned in functional vasodilation in skeletal muscle // J. Physiol. 1959. V. 149. P. 93–111.

16. *Duling B.R., Berne R.M.* Propagated vasodilation in the microcirculation of the hamster cheek pouch // Circulation Research. 1970. V. 26. P. 163–170.

17. *Burrows M.E., Johnson P.C.* Arteriolar responses to elevation of venous and arterial pressures in cat mesentery // Amer. J. Physiol. 1983. V. 245. P. H796–H807.

18. *Colantuoni A., Bertuglia S., Intaglietta M.* Quantitation of rhythmic diameter changes in arterial microcirculation // Amer. J. Physiol. 1984. V. 246, № 4, pt. 2. P. H508–H517.

19. *Руткевич И.М.* Волновые движения жидкости в трубках из вязкоупругого материала. Стационарные нелинейные волны // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1975. № 4. С. 86–95.

20. *Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С.* Математическое моделирование в биофизике. Введение в теоретическую биофизику. Изд. 2. М. ; Ижевск : ИКИ, 2004. 472 с.

21. *Клочков Б.Н., Романов А.С.* Модель активного перистальтического транспорта в биосистемах // Биофизика. 2013. Т. 58, вып. 5. С. 882–886.

22. *Клочков Б.Н., Кузнецова Е.А.* Активные волновые процессы в схлопывающихся сосудах и эффекты транспорта // Известия вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 9. С. 793–800.

23. *Клочков Б.Н.* Волновые процессы на клеточном уровне // Акустический журнал. 2011. Т. 57, № 2. С. 259–271.

24. *Клочков Б.Н., Елисеева Ю.Ю., Шилягин П.А.* Распространение низкочастотных волн в биологических тканях и сосудах // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 4/5. С. 506–515.

25. *Полянин А.Д., Зайцев В.Ф.* Справочник по нелинейным уравнениям математической физики. М. : Физматлит, 2002. 432 с.

26. *Лебедева Е.А., Артеева Н.В., Головко В.А.* Различия в чувствительности к лидокаину натриевых каналов клеток синусно-предсердного узла у кролика и мыши // IV Съезд биофизиков России. Симпозиум I: Физико-химические основы функционирования биополимеров и клеток (20–26 августа 2012) : материалы докладов. Н. Новгород : ННГУ, 2012. С. 173.

27. *Клочков Б.Н.* Модель волнового перемещения в биосистемах // Акустический журнал. 2018. Т. 64, № 3. С. 389–392.

Разделение состояний ментального и сенсорного внимания по ЭЭГ-данным с помощью сверточных нейронных сетей

И.С. Князева[1,3,4], Ю.А. Бойцова[2,4], Н.Г. Макаренко[1,4], С.Г. Данько[2]

[1]Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург
[2]Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН, Санкт-Петербург
[3]Санкт-Петербургский государственный университет
[4]Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК, Алматы, Казахстан
email: iknyazeva@gmail.com

Введение

В психофизиологической литературе [1] выделяется три вида внимания – сенсорное, моторное и ментальное. При этом термин «ментальное внимание» используется для внимания, которое обеспечивает контроль процесса мышления на основе целеполагания. Термины «ментальное» и «сенсорное» внимание могут быть также сопоставлены с терминами «интеллектуальное» и «перцептивное» внимание, используемыми в психологической литературе [2, 3], где перцептивное внимание определяется как внимание к сенсорным стимулам, а интеллектуальное внимание поведенчески определяется как внимание в отсутствие внешних воздействий.

Несмотря на длительную историю исследования, мозговые механизмы ментального и сенсорного внимания исследованы далеко не в равной степени. Причина такого неравенства связана с возможностью экспериментального контроля внешних входов в ситуациях исследования сенсорных процессов и отсутствием такой возможности для внутренних входов (мыслей, ассоциаций и воспоминаний) при исследованиях ментальных процессов. Однако в последнее время активно ищутся подходы, позволяющие учитывать влияние этих внутренних входов [4].

Исследование особенностей работы мозга при внутреннем ментальном внимании является важной фундаментальной проблемой, связанной с пониманием механизмов самосознания, процессов мышления и творчества. Исследование внутреннеориентированных ментальных состояний актуально и в прикладном плане в активно развивающихся в последнее время направлениях когнитивных наук, таких как brain reading или создание нейрокомпьютерных интерфейсов НКИ.

Последний осуществляет коммуникацию между мозгом и любыми внешними системами с помощью команд, поступающих напрямую из мозга человека. И ЭЭГ чаще всего используется в системах НКИ, поскольку является самым неинвазивным и относительно недорогим методом регистрации активности мозга. Развитие и качество работы НКИ зависят от того, насколько хорошо могут быть интерпретированы данные ЭЭГ. Главная задача здесь – это классификация временных рядов по выполняемым в момент снятия ЭЭГ умственным заданиям или физическим действиям. Из-за высокой чувствительности ЭЭГ к внешним воздействиям получаемые временные ряды обычно значительно зашумлены [5]. Поскольку необходимо добиться того, чтобы НКИ практически мгновенно интерпретировал поступающий сигнал и передавал его на внешние системы, приходится разрабатывать модели, способные классифицировать неочищенные, зашумленные данные. Модели, основанные на выделении признаков с помощью сверточных нейронных сетей, обладают достаточно высокой устойчивостью к шуму в данных, что было показано на широком спектре различных задач [6].

В настоящей работе сделана попытка разделения состояний с доминированием ментального и сенсорного внимания по индивидуальным коротким записям ЭЭГ с помощью таких нейронных сетей.

Описание схемы эксперимента

В исследовании приняло участие 28 здоровых испытуемых (11 мужчин и 17 женщин), средний возраст 29 лет. В соответствии с этическими стандартами Хельсинской декларации 1964 г. все испытуемые подписали добровольное согласие на участие в исследовании. Исследование было одобрено решением Этической комиссии Института мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН.

В данной работе использовались задания, при выполнении которых доминирует ментальное внимание (ДМВ) или сенсорное внимание (ДСВ). Тестовые задания предъявлялись блоками, в каждом блоке по 80 проб.

В блоке задания ДСВ пробами являлись пары стимулов (слово и соответствующее ему цветное изображение), испытуемые просматривали и запоминали изображения. В качестве заданий, в которых доминирует ментальное внимание (задания ДМВ), использовалось два типа заданий. В задании ДМВ на воспоминание в качестве проб использовались пары стимулов: слово и белый экран (предъявлялись слова, использованные в предыдущем задании ДСВ), испытуемых просили вспомнить и визуализировать на фоне белого экрана соответствующее слову изображение. В блоке заданий ДМВ на воображение пробами являлись два слова и белый экран. Здесь после одновременного предъявления 2 слов, испытуемых просили придумать и визуализировать на белом экране изображение-химеру. Длительность предъявления вербального стимула – 400 мс, длительность предъявления второго стимула (изображение или белый экран) – 5 с, интервал между сти-

мулами – 800 мс. Интервал между пробами – 700–1000 мс. Все задания выполнялись с открытыми глазами.

Обработка ЭЭГ-данных

Регистрация ЭЭГ производилась с помощью 19-канального компьютерного электроэнцефалографа «Мицар-202» и электроэнцефалографической шапочки Electro-Cap с 19 электродами, расположенными на поверхности головы в соответствии с системой «10–20» и референтными электродами на мочках ушей. Частота дискретизации – 500 Гц. Параметры ФВЧ и ФНЧ составляли соответственно 0,53 и 30 Гц. Кроме того, использовался режекторный фильтр, 45–55 Гц. Метод независимых компонент (ICA) применялся для коррекции артефактов моргания, кардиограммы и движения глаз в записях ЭЭГ; для разложения на компоненты использовался алгоритм Infomax.

Формирование данных для обучения

Данные ЭЭГ, использованные для обучения модели, представляли собой 83 файла, 3798 проб. Из них 1549 проб относились к сенсорному восприятию, 1364 пробы относились к процессу воспоминания и 885 проб – к процессу воображения. В качестве обучающих примеров для модели использовались пробы длиной 3480 отсчетов и шириной 19 (ширина временного ряда соответствует количеству ЭЭГ-каналов).

Обработка данных, а также обучение нейронной сети производились на языке программирования Python с использованием Jupyter Notebook [7] в среде Google Colaboratory [8]. В качестве фреймворка для построения и обучения модели использовался TensorFlow [9] – библиотека для работы с моделями машинного обучения от компании Google. Кроме того, использовалась библиотека Keras [10], являющаяся надстройкой над TensorFlow для удобной работы с нейронными сетями.

Из общего массива данных были удалены все пробы двух испытуемых, чтобы затем протестировать работу модели на пробах людей, которых она не видела в процессе обучения. Затем пробы были разделены на обучающую и валидационную выборки в пропорции 80 % к 20 %. Важно отметить, что разделение производилось отдельно по каждому файлу, т. е. если в одном файле содержалось 50 проб, то 40 проб из этого конкретного файла попадали в обучающую выборку, а 10 – в валидационную.

На каждом этапе обучения модели предъявлялось по 400 батчей[1] размером 50 для обучения и 1 батч размером 50 для валидации. На каждой итерации обучения батчи формировались случайным образом из соответствующих выборок (обучающей и валидационной). При этом примеры из обоих классов, а также из всех файлов попадали в батч с одинаковой вероятностью, что позволяло добиться более или менее сбалансированных батчей. Такой подход, заключающийся в формировании батчей с помощью генератора путем случайного выбора элементов из множества данных, позволяет обучить архитектуру достаточно большой нейронной сети при отсутствии огромного количества данных: несмотря на то, что во всем массиве данных содержалось лишь 3798 проб, на каждом этапе модели предъявлялось в общей сложности по 20 000 проб в разных случайных комбинациях.

В данной работе были использованы одномерные сверточные нейронные сети. Для борьбы с переобучением было использовано два метода регуляризации: *early stopping* и *dropout*, которые позволяют избежать переобучения, эффективно комбинируя множество разных нейросетевых архитектур [11]. При использовании dropout-регуляризации во время обучения на каждой итерации с определенной вероятностью из сети исключаются нейроны. Исключенный нейрон при любых входных данных возвращает нуль [11]. В данной работе dropout-регуляризация применялась к одному из полносвязных слоев глубокой нейронной сети. Вероятность исключения каждого отдельного нейрона этого слоя из обучения на одной итерации (параметр rate) составляла 0,3.

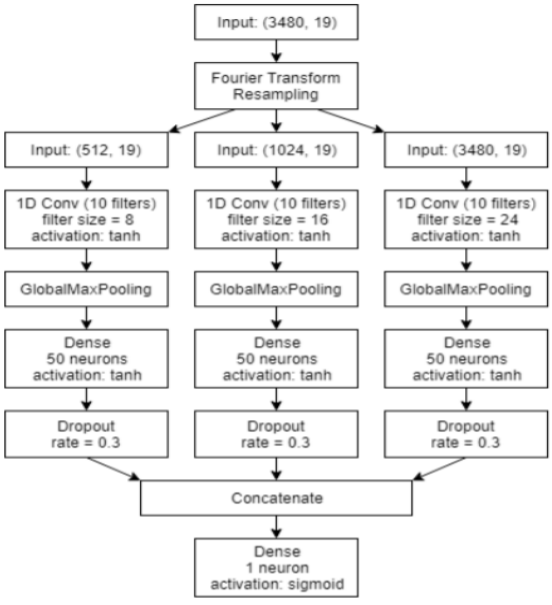


Рис. 1. Архитектура глубокой сверточной нейронной сети

На рис. 1 представлена архитектура использованной нейронной сети. В качестве прототипа была использована модель А. Киселева [12], которая, в свою очередь, основывается на рассмотренной ранее многомасштабной сверточной нейронной сети [13]. Исходный временной ряд подвергается ресемплингу[2] с помощью преобразования Фурье, в результате чего его длина уменьшается, но с сохранением частотной характеристики. Модель разделяется на 3 ветви, или на 3 подмодели: на

[1] Batch – подмножество обучающей выборки.

[2] Resampling – изменение частоты дискретизации сигнала.

первой ветви на вход подается исходный временной ряд без изменений, а на второй и третей – его укороченные версии длиной 1024 и 512 отсчетов.

Напомним, что в сверточной сети связи строятся двумя чередующимися способами: 1) свертка, 2) пулинг[3]. Свертка существенно не уменьшает размеры карт признаков, однако допускает увеличение их числа. Пулинг уменьшает размеры карт признаков, однако не изменяет их число. Слой пулинга обобщает (упрощает) информацию от слоя свертки.

В каждой подмодели временной ряд проходит через сверточный слой с размерами фильтров, которые увеличиваются с ростом детализации временного ряда, слой глобального (макс-) пулинга и полносвязный слой с 50 нейронами с dropout-регуляризацией для предотвращения переобучения. В подмодели для исходного временного ряда использовались фильтры размером 24, в подмодели для временного ряда средней длины – 16, а в подмодели для короткого ряда – 8. Таким образом, каждая из ветвей выделяет признаки из временного ряда на разных временных масштабах. Затем выходы всех подмоделей конкатенируются[4] и подаются на выходной слой, состоящий из одного нейрона с сигмоидной функцией активации.

В качестве функции потерь модели использовалась бинарная кросс-энтропия:

$$H_p(q) = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i \cdot \log(p(y_i)) + (1-y_i)\cdot \log(1-p(y_i)), \quad (1)$$

где y_i – это метка класса (0 или 1),

$p(y_i)$ – предсказанная моделью вероятность принадлежности примера к классу 1.

В качестве метрики качества использовалась метрика *accuracy*, которая показывает долю правильных ответов модели:

$$\text{accuracy}(a, X) = \frac{1}{l}\sum_{i=1}^{l}\left[a(x_i) = y_i\right], \quad (2)$$

где $a(x_i)$ – предсказанная моделью метка класса для примера, y_i – реальная метка класса.

Для оптимизации модели был использован метод оптимизации RMSProp (Root Mean Square Propagation) с параметром скользящего среднего $\beta = 0{,}9$.

В процессе обучения нейронной сети использовалась регуляризация *early stopping* для того, чтобы избежать переобучения. Early stopping останавливает обучение модели, если на протяжении определенного количества этапов значение функции потерь на валидационной выборке перестает падать. Количество этапов без улучшения определяется параметром *patience*. В данной работе было выбрано значение patience, равное 10, т. е., если после достижения минимального значения функции потерь на валидационной выборке новый минимум не достигается на протяжении 10 этапов, обучение останавливается.

[3] Pooling – группировка.

[4] Конкатенация – склейка с сохранением лингвистического порядка, например склейка строк «змейкой».

Результаты

На рис. 2 изображен график динамики функции потерь при обучении модели классификации проб ЭЭГ, где испытуемые выполняли ментальные или сенсорные задания. Темно-серая кривая – кривая для обучающей выборки, светло-серая кривая – для валидационной выборки. Точка показывает минимальное значение функции потерь для валидационной выборки, достигнутое на 43-м этапе: 0,0663.

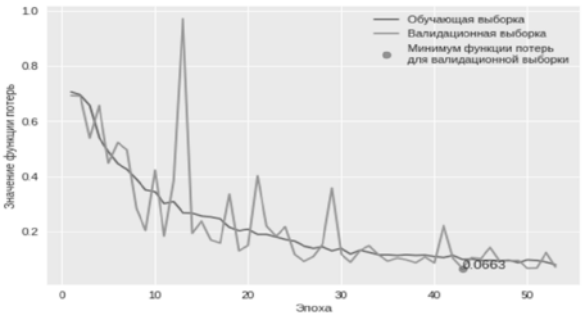


Рис. 2. График функции потерь для задачи классификации состояний ментального и сенсорного внимания

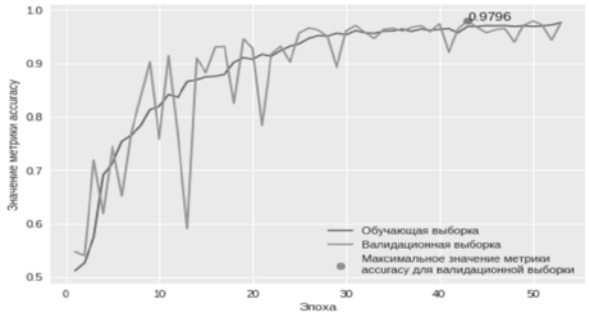


Рис. 3. График метрики accuracy для задачи классификации состояний ментального и сенсорного внимания

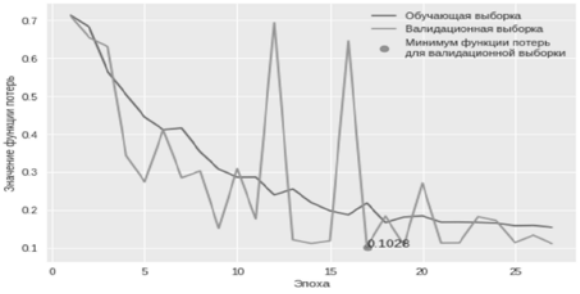


Рис. 4. График функции потерь для задачи классификации разных заданий на ментальное внимание (задание на воспоминание и задание на воображение)

На рис. 3 изображен график метрики accuracy для этой же задачи. Заметим, что на 43-м этапе, соответствующему минимальному значению бинарной кросс-энтропии, метрика accuracy достигла своего максимального значения на валидационной выборке: модель правильно классифицировала 97,96 % проб из валидационного батча, что свидетельствует о высоком качестве классификации.

На рис. 4 изображен график динамики функции потерь во время обучения модели классифи-

кации разных заданий на ментальное внимание (задание на воспоминание и задание на воображение). Заметим, что обучение прекратилось гораздо раньше, чем в первой задаче: уже после 17-го этапа значение функции потерь на валидационной выборке перестало падать, остановившись на значении 0,1028.

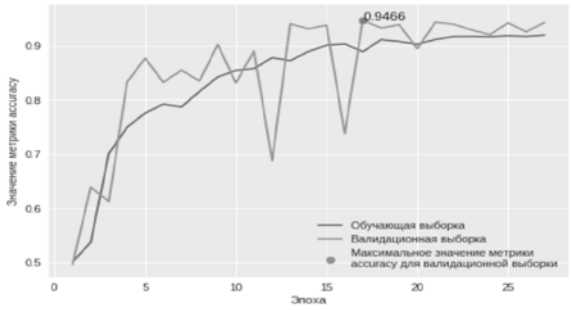


Рис. 5. График метрики accuracy для задачи классификации разных заданий на ментальное внимание (задание на воспоминание и задание на воображение)

На соответствующем графике метрики качества accuracy видно, что качество классификации также несколько хуже, чем для первой задачи (рис. 5). На 17-м этапе правильно классифицированы были 94,66 % проб из валидационного батча, что тем не менее все равно является достаточно высоким показателем.

Заключение

Использованная модель многомасштабной сверточной нейронной сети, основанная на работах [12, 13], способна классифицировать данные ЭЭГ по типам внимания (сенсорное или ментальное внимание).

С помощью предложенной модели удалось достичь высокого качества классификации как для разделения ментального и сенсорного внимания, так и для разделения близких типов ментального внимания (процесса воспоминания и процесса воображения). При использовании одной и той же модели результаты для классификации близких типов ментального внимания несколько хуже, чем для классификации состояний ментального и сенсорного внимания.

Особенность данной работы заключается в том, что она представляет собой попытку не просто классифицировать временные ряды ЭЭГ, а разделить их по умственным, мыслительным процессам, происходящим в мозге человека. Результаты, полученные в работе, могут иметь как практическую ценность, заключающуюся в перспективе улучшения систем НКИ, так и теоретическую, помогая глубже понять сложные когнитивные функции человека, такие как внимание, память и воображение.

Работа выполнена благодаря частичной поддержки гранта № AP 05134227 КН МОН РК, Казахстан.

Литература

1. *Данилова Н.Н.* Психофизиология : учебник для вузов. М. : Аспект Пресс, 2004. 95 с.

2. *Фаликман М.В.* Внимание : университетский учебник по психологии. Т. 4. М. : ACADEMIA, 2006. 155 с.

3. *Дормашев Ю.Б., Романов В.Я.* Психология внимания. М. : Тривола, 1995. 347 с.

4. *Christoff K., Fox K.C.R.* The Oxford handbook of spontaneous thought: mind-wandering, creativity, and dreaming. New York : Oxford University Press, 2018. 632 p. (Oxford Library of Psychology).

5. *Opalka S.* [*et al.*]. Multi-channel convolutional neural networks architecture feeding for effective EEG mental tasks classification // Sensors. Lodz. 2018. V. 18, № 10. Art. 3451. 21 p.

6. *Zhao B.* [*et al.*]. Convolutional neural networks for time series classification // Journal of Systems Engineering and Electronics. 2017. V. 28, № 1. P. 162–169.

7. Project Jupyter. URL: https://jupyter.org. (Дата обращения: 02.05.2019).

8. Google Colaboratory. URL: https://colab.research.google.com. (Дата обращения: 02.05.2019).

9. TensorFlow. URL: https://www.tensorflow.org. (Дата обращения: 03.05.2019).

10. Keras. URL: https://keras.io. (Дата обращения: 03.05.2019).

11. *Srivastava N.* [*et al.*]. Dropout: a Simple way to prevent neural networks from overfitting // J. Machine Learning Research. Toronto, 2014. V. 15. P. 1929–1958.

12. *Волкова К.В.* [*и др.*]. Интерфейс мозг-компьютер: опыт построения, использования и возможные пути повышения рабочих характеристик // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2017. Т. 67, № 4. С. 504–520.

13. *Cui Z., Chen W., Chen Y.* Multi-scale convolutional neural networks for time series classification // arXiv. 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1603.06995.

Овеществленное сознание в свете теории музыки

М. Корсакова-Крейн

Туро Колледж, Нью Йорк, США, email: marina.korsakova-kreyn@touro.edu

Музыку называют языком эмоций. Учитывая растущее признание первичной роли эмоций в эволюционном формировании сознания как такового, исследование восприятия музыки обещает обогатить наше понимание человеческого сознания. Музыка являет собой пример овеществленного (телесного) сознания, опирающегося на сенсорно-моторную информацию. Тогда как участие мышечных реакций в восприятии музыки не очевидно, традиционное музыковедение использует терминологию, которая указывает на значимость моторного компонента для мелодической морфологии.

Музыкальные композиции создаются из небольшого числа базовых мелодических элементов, отличающихся психофизическими характеристиками, среди которых дихотомия консонанс-диссонанс и уровень воспринимаемой тональной неустойчивости являются наиболее важными. И консонанс-диссонанс-дихотомия, и уровень воспринимаемой тональной неустойчивости объясняются в музыковедении как градации воспринимаемого напряжения. Эти градации имеют отношение к реальному физическому напряжению.

Для слушателя музыка развертывается во времени как паттерн из напряженных и ненапряженных мелодических сочетаний, производящих соответствующий паттерн мимолетных мышечных реакций. Скорее всего, именно моторный компонент критически важен для музыкальной терапии, практикуемой для пациентов с болезнью Паркинсона и при афазии Брока. Связь между воспринимаемым тональным напряжением и реальным физическим напряжением объясняет также силу музыкальных эмоций и их повсеместную доступность для людей с различными когнитивными возможностями.

Понятие овеществленного сознания предполагает, что сенсорно-моторный опыт формирует человеческое сознание [1–4]. Развитие теории овеществленного сознания опирается в основном на исследования зеркальных нейронов [5] и отношений между моторной системой и лингвистическим языком [6, 7]. В сердцевине этой теории находится понятие сознания [8–10]. По отношению к музыке особенно важны две нейробиологические модели человеческого сознания: модель функциональных блоков мозга Лурии [11] и модель триединого мозга Мак-Лина [12, 13].

Согласно эволюционной модели триединого мозга, иерархическая структура сознания состоит из рефлекс-комплекса, лимбической системы и коры головного мозга. Рефлекс-комплекс (рептильный мозг) отвечает за первичные формы сознания, т. е. за непосредственные ощущения. Вторичные формы представляют аффективное сознание пре-лингвистического эмоционального мышления; их нейробиологические коррелят – это лимбическая система [12]. Третичные формы поддерживают абстрактное мышление, воображение и специфически-человеческую способность мыслить, используя слова. На сегодня сознание определяется как эмерджентная особенность [14, 15], поддерживаемая сложными взаимодействиями между нейронными сетями [16, 17], образующими коннектом [18].

По модели триединого мозга музыкальное сознание являет собой вторичные формы, т. е. аффективное сознание [14]. Психологи называют эмоции суперординарными программами [19], оркеструющими процессы поведения. Понимание первичной роли эмоций (которые возникли как ответ живых организмов на валентность приходящей информации) в эволюционном формировании сознания [20] позволяет расстаться с «трудной задачей сознания» Чалмерса [21].

На сегодня признаны семь базовых эмоциональных систем [14], генетически закодированных в нейронных сетях подкорковых структур у млекопитающих. Базовые эмоции относятся к потребностям гомеостатического характера [22].

В отличии от базовых эмоций, в музыке мы имеем дело со сложными и трудно изучаемыми эстетическими эмоциями. Музыка способна влиять на жизненно важные физиологические показатели [23–25] и активизировать систему биологической награды [26]. Исследования эмоций в музыке прежде всего фокусируются на тональных отношениях [27], таких как минорный и мажорный лады [28, 29] и переориентация тональной системы отсчета [30–32]. Тональные отношения объясняются в музыковедении в терминах неустойчивости и напряжения [33–35].

Эмпирические исследования указывают на связь между воспринимаемым тональным напряжением и реальным физическим напряжением [36, 37]; это взаимодействие между двигательной системой и сенсорным восприятием определяет место музыки в области овеществленного сознания.

Известно, что переживание эмоций вызывает изменения вариабельности ритмов сердца [38] (этого крупного мускула человеческого тела), тогда как потеря движения при поражении моторной системы и соответствующее снижение активности симпатической нервной системы понижает уровень эмоциональной отзывчивости [39].

Изучение восприятия музыки и ее терапевтических эффектов требует понимания как основ музыкальной теории, так и природы основных мелодических элементов. Особенно интересна суть музыкальной системы отсчета, позволяющей создавать и считывать мелодическую информацию.

В музыке европейской традиции системой отсчета является диатоническая гамма. Семь тонов гаммы организованы иерархически, по уровням притяжения к тональному центру – тонике (первой ноте гаммы) (рис. 1). Кроме семи основных (диатонических) тонов, гамма включает пять хроматических тонов (рис. 2). Материя музыки циклична; повторение в разных регистрах тех же самых 12 тонов создает музыкальный диапазон (например, 88 нот на белых и черных клавишах рояля).

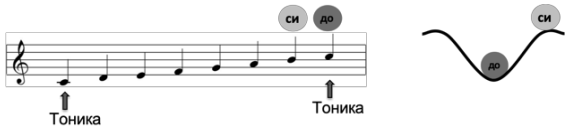


Рис. 1. В гамме тона отличаются по уровню притяжения к тонике. Например, в гамме «до мажор» ведущий тон «си» притягивается тонике «до»

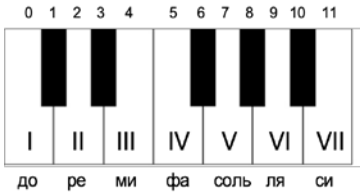


Рис. 2. Семь диатонических тонов гаммы «до мажор» обозначены римскими цифрами. Арабскими цифрами обозначены ступени хроматической гаммы, начинающейся на ноте «до»

Тот же принцип тонального притяжения определяет музыкальный синтаксис, костяк которого выражается лаконичной формулой мелодического движения: тоника (I), субдоминанта (IV), доминанта (V), тоника (I). Эта прочная перцептивная схема поддерживает богатство гармонического языка и степени свободы в музыке.

Расстояния между тоникой и другими тонами гаммы образуют 12 базовых мелодических интервалов, отличающихся по уровню благозвучия. Характер звучания мелодических сочетаний имеет отношение к различию в количестве общей важной спектральной информации [40]. Когда ноты принадлежат началу той же обертоновой серии (учитывая октавную эквивалентность), происходит дублирование важной спектральной информации, что должно облегчать обработку такого звукосочетания на уровне нейронных сетей. (Обертоновая серия является естественным результатом вибрации.) Например, благозвучные пифагорейские интервалы октава, квинта и кварта находятся в самом начале обертоновой серии (рис. 3). Когда две ноты образуют пифагорейский интервал, происходит дублирование одного из сильных начальных обертонов.

Гипотеза градиента нейронных затрат при обработке музыкальных звукосочетаний [41, 42] предполагает, что экономия нейронных затрат транслируется в благозвучие. Эта гипотеза согласуется с принципом наименьших усилий Ферреро [43].

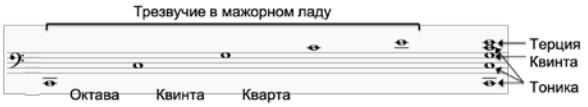


Рис. 3. Пифагорейские интервалы октава, квинта и кварта образуются сильными обертонами в самом начале обертоновой серии. Трезвучие в мажорном ладу состоит из основного тона и четырех начальных обертонов любого естественного музыкального звука

Существует эмпирическая поддержка этой гипотезы: исследования откликов ствола головного мозга на звуковые частоты (FFRs – brainstem frequency-following responses) показывают, что величина и когерентность откликов больше для консонансов, чем для диссонансов [44–45]. Максимум когерентности приходится на унисон, т. е. на сочетание двух звуков с идентичными фундаментальными тонами и обертоновыми сериями. Для трезвучий было обнаружено, что величина и когерентность откликов FFRs согласуются с уровнем воспринимаемого благозвучия: мажорное > минорное > уменьшенное > увеличенное (рис. 4). Мажорное трезвучие, воспринимаемое как «веселое» по сравнению с «грустным» минорным трезвучием, состоит из фундаментального тона и его четырех сильнейших обертонов (рис. 3), т. е. среди всех трезвучий тона мажорного трезвучия обладают максимальной общностью важной (громкой) спектральной информации.

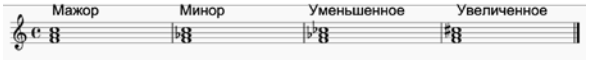


Рис. 4. Градиент воспринимаемого благозвучия. За «веселым» мажорным трезвучием следует «грустное» минорное трезвучие, затем напряженное уменьшенное трезвучие и «странное» увеличенное трезвучие (по [44, Fig. 2])

Скрытое взаимодействие между обертоновыми сериями разных музыкальных звуков производит поле «феноменальной тональной гравитации» [46]. В этом поле каждый приходящий звук и каждое звукосочетание приобретают тональный статус, становясь или устойчивым или неустойчивым. Причем неустойчивость ощущается как напряжение. Именно интуитивные ожидания того, что тональная неустойчивость должна разрешиться в устойчивость, создают ощущение движения в музыке.

Не исключено, что восприятие музыки содержит супрамодальный аспект. Согласно Лурии [11], вторичные и третичные корковые поля исполняют интеграционную роль, необходимую для более сложных гностических процессов, которые могут быть модально неспецифичны. Такое толкование высшей когнитивной деятельности дает обоснование для концепции квазипространственного мышления в музыке, включающего супрамодальный элемент.

Гипотеза супрамодальности в музыке [42, 47] предполагает, что мозг преобразует мелодическую информацию в музыкальные структуры (напри-

мер, мелодии) посредством регистрации отношений между разными мелодическими элементами в контексте тональной гравитации; при этом задействуются те же области теменной доли, что важны для обычного пространственного мышления. Хотя эта гипотеза получила эмпирическую поддержку [48], она нуждается в дальнейших исследованиях. Нейрокорреляты восприятия музыки могут также включать гиппокамп [49], а именно: гиппокамп может служить местом генерации мысленной карты тонального пространства (тональной системы отсчета).

Процессы восприятия и интеграции тональных паттернов преобразуются разумом слушателей в эмоции, т. е. в ощущение психологического времени. Способность музыки вызывать эстетические эмоции и активизировать как систему биологической награды, так и моторную систему, говорит о терапевтическом потенциале музыки. Например, неврологическая музыкальная терапия (NMT) помогает пациентам с инсультом, с болезнью Паркинсона [50, 51] и детям с аутизмом [52]. Ритмическая аудиостимуляция (RAS) улучшает моторику у пациентов с болезнью Паркинсона [53, 54]. Внезапное улучшение движений при звуках музыки у некоторых пациентов с болезнью Паркинсона демонстрирует, что музыка способна «настраивать» механизмы движения, пострадавшие в результате отмирания дофаминовых нейронов [55, 56].

Связь между тональными отношениями, музыкальным содержанием (эмоциями) и неявной активностью моторной системы является самым важным аргументом в пользу трактовки музыки как овеществленного сознания [57]. Слушание музыки опирается на интуитивное ощущение градаций тональной неустойчивости, дающих жизнь мелодическим рисункам и музыкальным структурам. Интуитивное восприятие мелодических паттернов, – образованных из диссонансов и консонансов, и уровней тонального притяжения – производит ответный паттерн мимолетной мышечной активности, синхронизированной с тонально-временной программой данного музыкального произведения.

Исследование музыкального восприятия как процесса, включающего не только слуховые, но и мышечные реакции, должно помочь созданию нейропсихологических обоснований для музыкальной терапии. Что же касается изучения эмоциональных процессов, связанных с музыкой, а также исследований восприятия квазипространственных аспектов музыкальных структур, то эти исследовательские работы важны для понимания человеческого сознания.

Литература

1. *Damasio, A.R.* Descartes' error: Emotion, reason, and the human brain. New York : Penguin Publishing Group, 1994.

2. *Foglia, L., Wilson, R.A.* Embodied cognition // WIREs Cognitive Science. 2013. V. 4, № 3. P. 319–325.

3. *Merleau-Ponty, M.* Phenomenology of perception // trans. C. Smith. London : Routledge and Kegan Paul, 1945/1962.

4. *Varela, F.J., Thompson, E., Rosch, E.* The embodied mind: Cognitive science and human experience. Cambridge : MIT Press, 1991.

5. *Aziz-Zadeh, L., Ivry, R.* Action representation and the mirror neuron system // Progress in motor control: A multidisciplinary perspective / ed. D. Sternad. Springer, 2009. P. 355–376.

6. *Wellsby, M., Pexman, P.M.* Developing embodied cognition: insights from children's concepts and language processing // Frontiers in Psychology. 2014. V. 5. P. 1–10.

7. *James, K.H., Maouene, J.* Auditory verb perception recruits motor systems in the developing brain: an fMRI investigation // Developmental Science. 2009. V. 12. P. F26–F34.

8. *Chemero,* A. Radical embodied cognitive science. Cambridge : MIT Press, 2009.

9. *Damasio, A.R.* The feeling of what happens: Body, emotion and the making of consciousness. London : Heinemann, 1999.

10. *Prinz, J.* Is consciousness embodied // The Cambridge Handbook of Situated Cognition / M. Aydede & P. Robbins (eds.). Cambridge : Cambridge University Press, 2009. P. 419–437.

11. *Luria, A.R.* The working brain: An introduction to neuropsychology. New York : Basic Books, 1973.

12. *MacLean, M.D.* Some psychiatric implications of physiological studies on frontotemporal portion of limbic system (visceral brain) // Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. 1952. V. 4, № 4. P. 407–418.

13. *MacLean, P.D.* The triune brain in evolution: role in paleocerebral functions. New York : Plenum Press, 1990.

14. *Panksepp, J.* Affective consciousness: Core emotional feelings in animals and humans // Consciousness and Cognition. 2005. V. 14, № 1. P. 30–80.

15. *O'Connor, T., Wong, H.Y.* Emergent properties // The Stanford encyclopedia of philosophy / ed. E.N. Zalta. 2015.

16. *Buzsaki, G.* Rhythms of the brain. New York : Oxford University Press, 2011.

17. *Fingelkurts, An.A., Fingelkurts, Al.A.* Dissipative many-body model and nested operational architectonics of the brain // Physics of Life Reviews. 2013. V. 10. P. 103–105.

18. *Seung, S.* Connectome: How the brain's wiring makes us who we are. Boston : Houghton Mifflin Harcourt, 2012.

19. *Cosmides, L., Tooby, J.* Evolutionary psychology and the emotions // Handbook of Emotions / eds. M. Lewis & J.M. Haviland-Jones. 2nd edition. New York : Guilford, 2000. P. 91–115.

20. *Friston, K.* Am I self-conscious? (Or does self-organization entail self-consciousness?) // Frontiers in Psychology. 2018. V. 9. P. 579 ; doi: 10.3389/fpsyg. 2018. 00579.

21. *Chalmers, D.J.* Facing up to the problem of consciousness // Journal of Consciousness Studies. 1995. V. 2. P. 200–219.

22. *Damasio, A., Damasio, H.* Exploring the concept of homeostasis and considering its implications for economics // Journal of Economic Behavior and Organization. 2016. V. 126, part B. P. 125–129.

23. *Bernardi, L., Porta, C., Sleight, L.* Cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory changes induced by different types of music in musicians and non-musicians: The importance of silence // Heart. 2006. V. 92. P. 445–452.

24. *Chanda, M.L., Levitin, D.J.* The neurochemistry of music // Trends in Cognitive Sciences. 2013. V. 17, № 4. P. 179–193.

25. *Krumhansl, C.L.* An exploratory study of musical emotions and psychophysiology // Canadian Journal of Experimental Psychology. 1997. V. 51. P. 336–352.

26. *Blood, A.J., Zatorre, R.J.* Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated with reward and emotion // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2001. V. 98. P. 11818–11823.

27. *Lerdahl, F., Krumhansl, C.L.* Modeling tonal tension // Music Perception. 2007. V. 24, № 4. P. 329–366.

28. *Hevner, K.* Experimental studies of the elements of expression in music // The American Journal of Psychology. 1936. V. 48, № 2. P. 246–268.

29. *Virtala, P., Tervaniemi, M.* Neurocognition of major-minor and consonance-dissonance // Music Perception: An Interdisciplinary Journal. 2017. V. 34, № 4. P. 387–404.

30. *Bigand, E., Delbé, C., Poulin-Charronnat, B., Leman, M., Tillman, B.* Empirical evidence for musical syntax processing? Computer simulations reveal. the contribution of auditory short-term memory // Frontiers in Systems Neuroscience. 2014. V. 94, № 8. P. 1–27.

31. *Koelsch, S., Rohrmeier, M., Torrecuso, R., Jentschke, S.* Processing of hierarchical syntactic structure in music // Proceedings of the N. A. S. of the USA. 2013. V. 110. P. 15443–15448.

32. *Korsakova-Kreyn, M., Dowling, J.W.* Emotional processing in music: Study in affective responses to tonal modulation in controlled harmonic progressions and real music // Psychomusicology: Music, Mind, and Brain. 2014. V. 24, № 1. P. 4–20.

33. *Fetis, F.-J.* Complete treatise on the theory and practice of harmony / tr. P.M. Landey. Hillsdale : Pendragon Press, 1844/2008.

34. *Lerdahl, F.* Tonal pitch space. New York : Oxford University Press, 2001.

35. *Schoenberg, A.* Structural functions of harmony. Stein, L. (tr.). Chicago : University of Chicago Press, 1954/1969.

36. *Madsen, C.K., Fredrickson, W.E.* The experience of musical tension: A replication of Nielsen's research using the continuous response digital interface // Journal of Music Therapy. 1993. V. 30. P. 46–63.

37. *Williams, L.R., Fredrickson, W.E., Atkinson, S.* Focus of attention to melody or harmony and perception of music tension: An exploratory study // International Journal of Music Education. 2010. V. 29, № 1. P. 72–81.

38. *McCraty, R., Shaffer, F.* Heart rate variability: New perspectives on physiological mechanisms, assessment of self-regulatory capacity, and health risk // Global Advances in Health and Medicine. 2015. V. 4, № 1. P. 46–61.

39. *Mack, H., Birbaumer, N., Kaps, H.-P., Badke, A., Kaiser, J.* Motion and emotion: Emotion processing in quadriplegic patients and athletes // Zeitschrift für Medizinische Psychologie [Journal of Medical Psychology]. 2005. V. 14, № 4. S. 159–166.

40. *Bowling, D., Purves, D.* A biological rationale for musical consonance // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2015. V. 112, № 36. P. 11115–11160.

41. *Korsakova-Kreyn, M.* Tonal processing and musical imagery: the tonal chronotope of music. 2005. URL: www.researchgate.net/publication/319330082.

42. *Korsakova-Kreyn, M.* The universe of music. Charleston : CreateSpace, 2010.

43. *Ferrero, G.* L'inertie mentale et la loi du moindre effort [Ментальная инерция и закон наименьших усилий] // Revue Philosophique de la France et de l'Étranger. 1894. V. 37. P. 169–182.

44. *Bidelman, G.M., Krishnan, A.* Neural correlates of consonance, dissonance, and the hierarchy of musical pitch in the human brainstem // The Journal of Neuroscience. 2009. V. 29, № 42. P. 13165–13171.

45. *Bidelman, G.M., Krishnan, A.* Brainstem correlates of behavioral and compositional preferences of musical harmony // NeuroReport. 2011. V. 22. P. 212–216.

46. *Scruton, R.* The aesthetics of music. Oxford : Oxford University Press, 1997.

47. *Korsakova-Kreyn, M.* Bach, Escher, and mental rotation: An empirical study in the perception of visual and melodic congruency // Proceedings of the 2014 Congress of the IAEA. New York, 2014. P. 495–504.

48. *Foster, N.E.V., Zatorre, R.J.* A role for the intraparietal sulcus in transforming musical pitch information // Cerebral Cortex. 2010. V. 20, № 6. P. 1350–1359.

49. *Hartley, T., Lever, C., Burgess, N., O'Keefe, J.* Space in the brain: how the hippocampal formation supports spatial cognition // Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences. 2014. V. 369, № 1635. Art. 20120510 ; doi:10.1098/rstb.2012.0510.

50. *Altenmüller, E., Schlaug, G.* Apollo's gift: New aspects of neurologic music therapy // Progress in Brain Research. 2015. V. 217. P. 237–252.

51. *Thaut, M.H., McIntosh, G.C., Hoemberg, V.* Neurobiological foundations of neurologic music therapy: rhythmic entrainment and the motor system // Frontiers in psychology. 2014. V. 5. Art. 1185 ; doi:10.3389/fpsyg.2014.01185.

52. *James, R., Sigafoos, J., Green, V.A., Lancioni, G.E., O'Reilly M.F., Lang, R., Davis, T., Carnett, A., Achmadi, D., Gevarter, C., Marschik, P.B.* Music therapy for individuals with autism spectrum disorder: A systematic review // Review Journal of Autism and Developmental Disorders. 2015. V. 2, № 1. P. 39–54.

53. *Ashoori, A., Eagleman, D.M., Jankovic, J.* Effects of auditory rhythm and music on gait disturbances in Parkinson's disease // Frontiers in Neurology. 2015. V. 6, № 234 ; doi.org/10.3389/fneur.2015.00234.

54. *Bukowska, A.A., Krężałek, P., Mirek, E., Bujas, P., Marchewka, A.* Neurologic music therapy training for mobility and stability rehabilitation with Parkinson's disease - a pilot study // Frontiers in Human Neuroscience. 2015. V. 9, № 710 ; doi: 10.3389/fnhum.2015.00710.

55. *Parker, N.F., Cameron, C.M., Taliaferro, J.P., Lee, J., Choi, J.Y., Davidson, T.J., Daw, N.D., Witten, I.B.* Reward and choice encoding in terminals of midbrain dopamine neurons depends on striatal target // Nature Neuroscience. 2016. V. 19, № 6. P. 845–854.

56. *Xua, Z., Chu, X., Jiang, H., Schilling, H., Chen, S., Feng, J.* Induced dopaminergic neurons: A new promise for Parkinson's disease // Redox Biology. 2017. V. 11. P. 606–612.

57. *Korsakova-Kreyn, M.* Two-level model of embodied cognition in music // Psychomusicology: Music, Mind, and Brain. 2018. V. 28, № 4. P. 240–259.

Самодетерминация актуализации опыта порождает фрактальную структуру поведения

А.К. Крылов

Институт психологии РАН, Москва; email: neuru@mail.ru

Значение фрактальной структуры поведения

Поведение в однородной бесстимульной среде обладает свойством фрактальной структуры [1–3]. Этот факт противоречит рефлекторной теории, основанной на парадигме реактивности, в соответствии с которой поведение детерминируется внешними воздействиями («стимулами»), а следовательно, при отсутствии потока сложности из внешней среды, рефлекторный агент не может продемонстрировать сложное поведение, обладающее фрактальной структурой [4–7]. Феномен фрактальной структуры поведения в однородной («пустой») среде означает наличие внутренних детерминант поведения, генерацию сложности поведения внутренними механизмами мозга или организма в целом. Это противоречит рефлекторной теории и может рассматриваться как аргумент в пользу наличия у живых существ разного эволюционного уровня (неосознанной) свободы выбора [2, 7, 8].

Теория рефлекса предполагает, что текущее действие детерминируется прошлым внешним стимулом [6, 7], поэтому она не рассматривает зависимость текущего действия от прошлого действия и эффекты преднастройки, для объяснения которых может использоваться системная психофизиология [9], основанная на парадигме активности – антиподе парадигмы реактивности [10]. Феномен автокорреляций в поведении – когда следующее действие с большей вероятностью совпадает с предыдущим [11] – означает наличие внутренних детерминант и не рассматривается в парадигме реактивности. Например, в поисковом поведении в однородной среде статистика длительностей движения в одном направлении имеет степенной характер (сплошная кривая на рис. 1) [1, 2, 6] – такой же, как у фракталов, т. е. не случайный. Рефлекторный агент, совершающий действия (рефлексы) с фиксированными вероятностями, не может генерировать такую статистику поведения [6] (прерывистая кривая на рис. 1), поэтому наличие фрактальной структуры поведения или хотя бы наличие степенной формы распределения длительностей действий (как на рис. 1, сплошная кривая) доказывает их внутреннюю причинность [2, 7, 8].

Из рис. 1 видно, что в модели с динамикой актуализации опыта (1) сплошную кривую на участке от 0,5 до 3,5 можно аппроксимировать прямой (показана точечной линией), что говорит в пользу фрактальности (степенная зависимость). В модели с постоянной вероятностью продолжения движения в том же направлении (2) прерывистая кривая не имеет линейного участка. Видно, что сплошная кривая на участке от 3 до 5 находится выше прерывистой, т. е. в модели с динамикой актуализации (1) порождаются более длинные цепочки движений в одном направлении.

Феномен фрактальной структуры обнаружен также в спайковой активности нейронов [4, 12, 13], в психологической структуре опыта [14]. Этот феномен сложности структуры обнаруживается на разных уровнях организации активности [6].

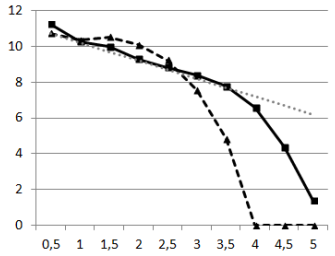


Рис. 1. Статистика длительностей движения в одном направлении в модели. По горизонтали – логарифм количества шагов в одном направлении. По вертикали – логарифм числа случаев

Модель динамики актуализации

Ранее нами было показано, что системная структура опыта [15, 16], в отличие от набора рефлексов, может быть причиной фрактальной структуры поведения [6]. В системной психофизиологии организация поведения рассматривается как актуализация элементов опыта в этот момент [15–19], что при рассмотрении движения в среде, состоящего только из движения вперед и поворота [1], можно представить как вероятность актуализации элемента опыта «двигаться вперед», а когда он неактивен, то совершается «поворот» [6]. Любому элементу опыта можно сопоставить степень его актуализации в данный момент $A(t)$, и она вариативна в последовательных реализациях этого акта [9, 18]. Физиологически актуализация элемента опыта реализуется активностью нейронов, образующих этот элемент опыта [15–19], и степень актуализации отражается в величине спайковой активности этих нейронов в данном акте [18].

В нашей модели [6] вероятность совершения действия «движение вперед» равна $A(t)$, поэтому совершение действия определяется внутренней переменной, т. е. детерминируется изнутри, а изменение актуализации $A(t)$ зависит только от нее самой, не определяется внешней средой:

$A(t+1) = A(t) + k \cdot (0,9 - A(t))$, если «вперед»; (1)

$A(t+1) = A0$, если «поворот».

Такое изменение актуализации опыта $A(t)$ можно считать самодетерминацией – с вероятностью $A(t)$ она изменяется по указанной формуле, а с вероятностью $1 - A(t)$ приравнивается к константе. Модель демонстрирует фрактальные свой-

ства поведения в широком диапазоне параметров $A0$ и k [6]. В настоящей работе использовались $k = 0{,}3$; $A0 = 0{,}5$.

Результаты сравнивались с моделью, в которой $A(t)$ постоянно и равно 0,7. Эта величина выбрана равной средней величине $A(t)$, полученной в экспериментах с первой моделью. Таким образом, средняя величина вероятности «движения вперед» совпадала в обеих моделях, но в первой она динамически менялась на основе самодетерминации, без влияния внешней среды [7]. Во второй модели

$$A(t+1) = 0,7\,. \qquad (2)$$

Статистика длин последовательностей движений в одну сторону для первой модели, с самодетерминацией динамики актуализации элемента опыта «движение вперед», имеет степенной вид (пример на рис. 1, сплошная кривая), что говорит в пользу фрактальной структуры и соответствует экспериментальным данным [1, 3]. Для второй модели, с фиксацией вероятности продолжения движения вперед, результаты имеют другой вид (пример на рис. 1, прерывистая линия). Эти данные аналогичны описанным нами ранее для этой модели [6]. Отметим математическое сходство нашей модели с другой моделью, в которой также получена фрактальная структура поведения [20] и которая также может объяснить длительные повторные применения одного действия, обнаруженные в этологии [21].

Аналогичный результат получен нами в модели актуализации структуры опыта [22], основанной на том же принципе динамики актуализации, тогда как здесь рассмотрен лишь один элемент опыта.

Что дает фрактальная структура поиска

Обнаружение фрактальной структуры поведения требует не только объяснения механизма ее генерации, но и объяснения ее выгод для индивида, если они есть. Казалось бы, поисковое поведение в однородной среде можно организовать как случайное блуждание, с какой-то вероятностью смены направление, как и сделано в нашей второй модели с фиксированной вероятностью. На рис. 2 показан для сравнения пример движения в обеих наших моделях. Видно, что в первой модели, с динамикой актуализации, в итоге достигается большее перемещение относительно стартовой позиции, чем во второй (черная линия за 50000 тактов уходит на расстояние около 2000 ед., а серая – на 1000 ед.). Случайное блуждание, также называемое броуновским, не позволяет вести поиск достаточно далеко от стартовой позиции, можно сказать, поиск идет локально, вокруг старта. Именно фрактальность, характеризующаяся так называемым heavy-tailed-распределением (см. рис. 1, сплошная линия, ось абсцисс от 3 до 5), позволяет порождать длительные движения в одну сторону, что и уводит поиск далеко от старта (рис. 2, черная линия).

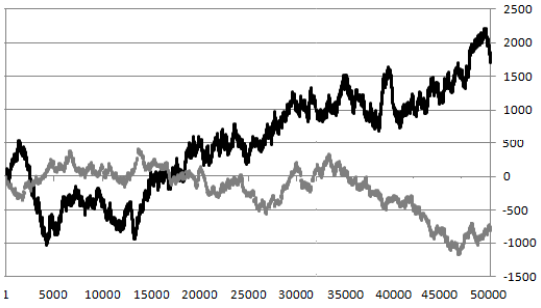


Рис. 2. Пример движения в модели. По горизонтали – время. По вертикали – положение агента. Черная кривая – модель с динамикой актуализации (1), серая кривая – модель с фиксацией вероятности продолжения движения в том же направлении (2). Стартовая позиция обозначена 0

Для изучения возможностей обеих моделей по дальности поиска были проведены 500 испытаний, каждое по 500000 тактов. По ним собиралась статистика положений агентов и строилась суммарная гистограмма (рис. 3). Далее оценивалась дисперсия полученных распределений: среднеквадратичное отклонение для первой модели равно 879, для второй – 458 (почти в 2 раза меньше). Видно, что для модели с динамикой актуализации и фрактальным характером поиска дальность поиска доходит до 6000 (рис. 3, сплошная кривая), тогда как для модели случайного поиска «броуновским блужданием» дальность поиска доходит до 3000 (рис. 3, прерывистая кривая), причем уже на расстоянии от 1500 первая модель оказывается во много раз чаще, что отражает свойство heavy-tailed фрактального распределения, т. е. поиск в модели (1) ведется не так локально, как в модели (2).

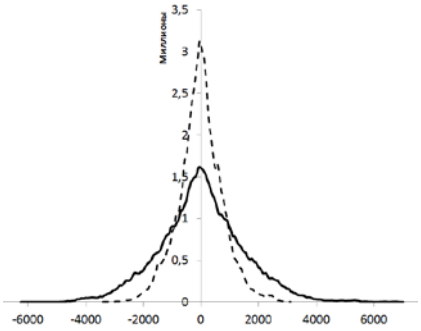


Рис. 3. Суммарная гистограмма положений агентов в двух моделях в 500 испытаниях по 500000 тактов в каждом. Сплошная линия – в модели динамики актуализации опыта (1), прерывистая – с фиксированной вероятностью совершения действия (2). По горизонтали – расстояние текущего положения от старта. По вертикали – количество случаев

Заключение

Автокорреляции действий [9, 11], т. е. повтор того же действия в следующий момент с большей вероятностью, чем других, нарушают принцип случайности вероятностного принятия решения, противоречат идее принятия решений как вероятностного выбора из альтернатив. Полагаем, этот феномен говорит в пользу того, что элементы опыта являются активными (системами) [10, 19], подобно организму (надсистеме) [10], и, находясь в системных отношениях друг с другом [9, 16],

каждый элемент «сам решает» продолжать ли активацию [6, 7], т. е. актуализация элемента опыта обладает свойством самодетерминации (1) [7]. Такое, обоснованное с позиций системной психофизиологии [15, 16], основанной на парадигме активности [10], понимание актуализации элементов опыта [18] как самодетерминации (1) [7] позволяет материалистически подойти к решению вопроса о свободе выбора, о которой косвенно говорит фрактальность структуры поведения в однородной среде [2, 7, 8]. В настоящей работе показано, что такой механизм имеет преимущество по сравнению с вероятностным принятием решений (2), по крайней мере в поисковом поведении в однородной среде – поиск глобальней.

Работа выполнена по государственному заданию ФАНО России № 0159-2019-0001.

Литература

1. *Непомнящих В.А.* Фрактальная структура поведения золотых рыбок Carassius auratus L. (Cyprinidae: Pisces) // Журн. общ. биологии. 1998. Т. 59, № 5. С. 513–530.

2. *Maye A., Hsieh Ch., Sugihara G., Brembs B.* Order in spontaneous behavior // PLoS ONE. 2007. V. 2(5). Art. e443.

3. *Proekt A., Banavar J.R., Maritan A., Pfaff D.W.* Scale invariance in the dynamics of spontaneous behavior // Proc. Natl Acad. Sci. USA. 2012. V. 109. P. 10564–10569.

4. *Крылов А.К.* Фрактальный анализ активности нейронов и поведения модели // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 109–116.

5. *Крылов А.К.* Роль модельного эксперимента и фрактального анализа данных в психологическом исследовании // Экспериментальная психология в России: традиции и перспективы. М. : Ин-т психологии РАН, 2010. С. 106–110.

6. *Крылов А.К.* Актуализация опыта как возможная причина фрактальной структуры поискового поведения // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2017: труды V Всероссийской конференции. Н. Новгород : Институт прикладной физики РАН, 2017. С. 128–131.

7. *Крылов А.К.* Механизм внутренней детерминации поведения в системной психофизиологии // Труды XVI национальной конференции по искусственному интеллекту КИИ-2018. Т. 2. М. : РКП, 2018. С. 62–70.

8. *Непомнящих В.А.* Изменчивость поведения беспозвоночных и проблема свободы воли // Журнал общей биологии. 2012. Т. 73, № 6. С. 435–443.

9. *Безденежных Б.Н.* Динамика взаимодействия функциональных систем в структуре деятельности. М. : Ин-т психологии РАН, 2004.

10. *Крылов А.К., Александров Ю.И.* Парадигма активности: от методологии эксперимента к системному описанию сознания и культуры // Компьютеры, мозг, познание : успехи когнитив. наук / отв. ред. Величковский Б.М., Соловьев В.Д. М. : Наука, 2008. С. 133–160.

11. *Непомнящих В.А.* Увеличение изменчивости поведения животных вследствие автокорреляций // Журнал общей биологии. 2012. Т. 73, № 4. С. 243–252.

12. *Бибиков Н.Г., Дымов А.Б.* Факторы Фано и Аллана, характеризующие процессы спонтанной импульсной активности слуховых нейронов продолговатого мозга лягушки // Сенсорные системы. 2009. Т. 23, № 3. С. 246–259.

13. *Teich M.C.* [*et al.*]. Temporal correlation in cat striate-cortex neural spike trains // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. 1996. V. 15(5). P. 79–87.

14. *Максимова Н.Е., Александров И.О., Турубар Д.С.* Топологические свойства семантической сети, представляющей структуру знания: неоднородность и безмасштабность // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 144–146.

15. *Швырков В.Б.* Введение в объективную психологию : нейрональные основы психики / под ред. Ю.И. Александрова. М. : Ин-т психологии РАН, 1995.

16. *Александров И.О.* Формирование структуры индивидуального знания. М. : Ин-т психологии РАН, 2006.

17. *Александров Ю.И., Горкин А.Г., Созинов А.А., Сварник О.Е., Кузина Е.А., Гаврилов В.В.* Консолидация и реконсолидация памяти: психофизиологический анализ // Вопросы психологии. 2015. № 3. С. 133–144.

18. *Александров Ю.И., Шевченко Д.Г., Горкин А.Г., Гринченко Ю.В.* Динамика системной организации поведения в его последовательных реализациях // Психологический журнал. 1999. Т. 20, № 2. С. 82–89.

19. *Сварник О.Е.* Активность мозга: специализация нейрона и дифференциация опыта. М. : Ин-т психологии РАН, 2016. 190 с.

20. *Непомнящих В.А., Редько В.Г.* Метод формирования поискового поведения // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 1. С. 49–54.

21. *Непомнящих В.А., Осипова Е.А., Панкова Н.А.* Спонтанная организация исследовательского поведения рыб // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 149–151.

22. *Крылов А.К.* Модель активации специализированных нейронов в поисковом поведении // XX Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2018» : сб. науч. трудов. Ч. 2. М. : НИЯУ МИФИ, 2018. С. 144–153.

Идентификация функции приспособленности с использованием нейронных сетей

О.А. Кузенков, Г.В. Кузенкова

Институт информационных технологий, математики и механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород; email: kuzenkov_o@mail.ru

Ключевую роль в современной теории биологической эволюции играет дарвиновская идея выживания «наиболее приспособленных» [1]. Первые шаги, направленные на построение корректной математической формализации этой идеи, были предприняты в работах Холдейна, Фишера и Райта [2–4]. Необходимым элементом такой формализации является введение пространства наследственных элементов (генотипов, признаков, стратегий поведения и т. п.) и функции приспособленности (фитнеса), характеризующей селективные преимущества каждого наследственного элемента. По образному выражению Райта, в этом случае процесс эволюции можно представить как подъем на холм графика функции приспособленности в пространстве наследственных элементов. С течением времени в популяции остается только тот элемент, для которого функция приспособленности принимает наибольшее значение. Основная проблема состоит только в том, чтобы найти адекватное выражение для функции приспособленности.

Проблема построения функции приспособленности рассматривалась многими авторами на основе различных методик. Но ее решение далеко от завершения. Нередко выбор функции приспособленности зависит от субъективных предпочтений исследователей. Разные подходы дают разные выражения для такой функции, что ведет к различным и даже противоречащим выводам о результатах эволюции. Так, например, в одних исследованиях в качестве функции приспособленности выбирается разность между коэффициентами размножения и смертности в результате хищничества, а в других – отношение коэффициента размножения к коэффициенту смертности.

В настоящее время для математического моделирования эволюционно устойчивого поведения широко используется метод адаптивной динамики [5–6]. Кроме этого, существует несколько более общий подход, предложенный в [7], который опирается на рассмотрение долговременной динамики распределения численности популяции по пространству наследственных стратегий. Изучение свойств указанного распределения при неограниченно больших временах позволяет ввести порядок предпочтительности, отражающий селективные преимущества различных стратегий, и задать функцию фитнеса, соответствующую введенному порядку [8–9]. В работах [9–12] было выведено аналитическое выражение функции фитнеса для ряда релевантных моделей динамики популяции.

В настоящей работе предлагается новая методика решения поставленной задачи на основе технологий искусственных нейронных сетей. Целью настоящей работы является создание обучающейся нейронной сети для идентификации функции приспособленности, отражающей селективные преимущества наследственных ежедневных вертикальных миграций зоопланктона.

Пусть задано некоторое сообщество, V – множество наследственных элементов v, например, такими элементами могут быть непрерывные функции поведения. Предполагается, что V – компактное метрическое пространство.

Каждому элементу v в каждый момент времени t ставится в соответствие некоторое неотрицательное число $\rho(v,t)$, численно характеризующее присутствие этого элемента в системе в указанный момент времени. Это число равно нулю в случае, когда элемент в системе отсутствует, и строго больше нуля в случае наличия данного элемента. Таким показателем может быть численность, биомасса особей с данным наследственным элементом, плотность распределения численности популяции по пространству наследственных единиц и т. п. Предполагается, что показатель существования непрерывно зависит от времени, кроме того стремление этого показателя к нулю соответствует исчезновению (вымиранию, утрате) данного элемента.

Зная динамику величины $\rho(v,t)$, можно сравнить селективные преимущества различных наследственных единиц друг с другом. Будем говорить, что элемент v более приспособлен, чем w $(v > w)$, если справедливо соотношение

$$\lim_{t\to\infty} \rho(w,t)/\rho(v,t) = 0,$$

т. е. если элемент v вытесняет элемент w из популяции с течением времени.

Предположим, что введенный порядок сравнения не меняется при изменении начальных условий; некоторый функционал $J(v)$ выражает введенный порядок, т. е. $J(v) > J(w)$ тогда и только тогда, когда v лучше w $(v > w)$. Тогда функционал J является функцией приспособленности, отражающей селективные преимущества различных наследственных элементов.

Типичной ситуацией является случай, когда динамика показателя существования определяется значениями конечного набора параметров, соответствующих наследственному элементу (наследуемой функции поведения):

$$\rho(v,t) = \rho(M(v),t), \quad M(v) = (M_1(v), ..., M_n(v)).$$

В случае, когда динамика показателя существования однозначно определяется значениями

параметров, соответствующих наследственному элементу, функционал J также будет функцией, зависящей лишь от этого набора параметров:

$$J(v) = J(M(w)).$$

Если функция $J(M)$ является достаточно гладкой, то для приближенного построения целесообразно использовать ее разложения по формуле Тейлора:

$$J(M) = J(M_0) + dJ_{|M_0} + d^2 J_{|M_0} + ...$$

$$... + d^k J_{|M_0} + o(\|M - M_0\|^k).$$

При этом подлежат определению только значения коэффициентов Тейлора. Не уменьшая общности, можно считать, что $J(M_0) = 0$ (так как важно не абсолютное значение функции J, а относительное – сравнение с ее помощью разных наследственных элементов).

В простейшем случае возможно линейное приближение функции $J(M) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i M_i$. Чтобы найти коэффициенты свертки λ_i, необходимо учесть известную информацию о наблюдаемой динамике наследственных элементов. Пусть данные о динамике величин $\rho(v, t)$ и $\rho(w, t)$ позволяют заключить, что элемент v вытесняет элемент w, т. е. элемент v лучше, чем элемент w, а также известны значения параметров, соответствующие этим элементам: $M_i(v)$ и $M_i(w)$. Тогда должно иметь место неравенство $J(M(v)) > J(M(w))$. Следовательно, коэффициенты λ_i должны удовлетворять неравенству

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i M_i(v) > \sum_{i=1}^{n} \lambda_i M_i(w).$$

Поставим в соответствие паре (v, w) точку $M(v) - M(w)$, паре (w, v) – точку $M(w) - M(v)$ в n-мерном пространстве параметров. Тогда гиперплоскость

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i M_i = 0$$

должна отделять эти точки друг от друга. При наличии некоторой выборки пар наследственных элементов с известными результатами сравнения и известными значениями параметров M в n-мерном пространстве получается два множества, которые должны лежать по разные стороны от указанной гиперплоскости. Таким образом, задача определения коэффициентов λ_i функции приспособленности сводится к нахождению компонент нормали гиперплоскости, разделяющей два множества точек в n-мерном пространстве. Это типичная задача распознавания образов, которая может быть решена с помощью обучающихся нейронных сетей, в частности с помощью простейшей однослойной сети. Но в отличие от классических задач здесь в итоге осуществляется не простое распознавание принадлежности элемента к одному из двух классов – «хороших» и «плохих», а сравнение элементов по принципу «лучше-хуже», что отражает важнейшую способность живых систем. Такое сравнение сводится к распознаванию принадлежности упорядоченных пар элементов «первый, второй (v, w)» к одному из двух классов: «первый лучше второго $(v > w)$» или «первый хуже второго $(v < w)$».

Разумеется, линейная аппроксимация может применяться не всегда. Могут появляться случаи, когда построенные множества нельзя разделить никакой гиперплоскостью. В этом случае нужно применять аппроксимацию функции приспособленности более высокого порядка – второго, третьего и т. п. В случае аппроксимации второго порядка $J(M) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i M_i + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \lambda_{ij} M_i M_j$ каждому наследственному элементу v ставится в соответствие набор следующих значений:

$$(M_1(v), ..., M_n(v), M_1^2(v), ..., M_n^2(v),$$

$$M_1(v)M_2(v), M_1(v)M_3(v), ..., M_{n-1}(v)M_n(v)).$$

Далее аналогично предыдущему случаю формируются точки в пространстве размерности $n + n^2$ для известных пар и строится разделяющая гиперплоскость

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i M_i + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \lambda_{ij} M_i M_j = 0.$$

Компоненты нормали $\lambda_i \lambda_{ij}$ разделяющей гиперплоскости будут коэффициентами приближения второго порядка функции приспособленности. Задача построения разделяющей гиперплоскости также решается с помощью обучающейся нейронной сети.

Несомненное преимущество указанного подхода к идентификации функции приспособленности состоит в том, что найденное приближение легко корректируется при добавлении новых эмпирических данных. Это соответствует естественному процессу обучения при накоплении опыта.

Описанная методика была применена для построения функции приспособленности, отражающей селективные преимущества вертикальных миграций зоопланктона.

Явления повторяющихся в течение дня вертикальных перемещений водных организмов были обнаружены почти двести лет назад [13–15]. Ежедневные вертикальные движения зоопланктона играют важную роль в динамике органического вещества океана, они являются наиболее значительными синхронными движениями биомассы на Земле [16, 17] и могут потенциально оказывают влияние на климат планеты [18, 19]. Эффект вертикальных движений зоопланктона изучался многими учеными как эмпирически, так и теоретически. Некоторые недавние результаты многолетних наблюдений за ежедневными миграциями приведены на следующих ресурсах: http://www.oceannetworks.ca/zap-datasaanich-inlet и http://hdl.

handle.net/1828/4630. Были рассмотрены различные математические модели этого явления, однако ряд существенных аспектов до сих пор изучен еще недостаточно [19–27]. В частности, это связано с широким разнообразием режимов ежедневных миграций, наблюдаемых в природе [13].

Пусть x – вертикальная координата положения зоопланктона; t – время дня от 0 до 1; $v = x(t)$ – наследственная стратегия поведения планктона, $V = C_1[0;1]$ множество непрерывно дифференцируемых функций на сегменте $[0;1]$, удовлетворяющих условию $x(0) = x(1)$. Эволюционно устойчивое движение зоопланктона определяется различными факторами окружающей среды: пространственным распределением пищи (фитопланктона) $E(x)$ по вертикальной координате x, плотностью хищника $S_x(x)$, активностью хищника $S_t(t)$ в течение дня, совокупностью дополнительных факторов, определяющих условия обитания $G(x)$ (температура, радиация, концентрация кислорода, сероводорода и т. п.) [13, 20–27]. Все эти факторы могут быть рассмотрены как математические функции вертикальной координаты x или времени суток t. Предполагается, что энергетические затраты на вертикальное движение пропорциональны квадрату его скорости $x'(t)$ (кинетической энергии).

Зная функции внешних факторов и наследственную стратегию поведения, можно вычислить соответствующие ей параметры

$$M_1(v) = \int_0^1 E(x(t))dt,\ M_2(v) = \int_0^1 S_t(t)S_x(x(t))dt,$$

$$M_3(v) = -\int_0^1 (x'(t))^2 dt,\ M_4(v) = -\int_0^1 G(x(t))dt.$$

В простейшем случае функция приспособленности зависит от этих параметров линейно следующим образом:

$$J(v) = \alpha M_1(v) + \gamma M_2(v) + \beta M_3(v) + \delta M_4(v).$$

Весовые коэффициенты $\alpha, \gamma, \beta, \delta$ определяют степень влияния каждого фактора на общую приспособленность. Задача состоит в отыскании значений этих коэффициентов.

Для решения этой задачи необходимо использовать информацию об известных стратегиях поведения. Если известна долгосрочная динамика показателей $\rho(v,t)$ и $\rho(w,t)$, отвечающих стратегиям v и w, то можно сравнить эти стратегии друг с другом. Зная результаты сравнения для некоторого множества прецедентов, можно использовать описанную выше технологию распознавания для оценки значений коэффициентов $\alpha, \gamma, \beta, \delta$.

Для решения этой задачи была построена однослойная нейронная сеть, позволяющая распознавать пары наследственных стратегий по их принадлежности к двум классам – «первая пара лучше второй» или «вторая пара лучше первой». Математически это соответствует построению гиперплоскости в четырехмерном пространстве параметров, разделяющей два множества точек. Координаты нормали построенной гиперплоскости соответствуют значениям искомых коэффициентов $\alpha, \gamma, \beta, \delta$.

На основе результатов натурных наблюдений [13, 20] была сформирована обучающая и тестовая выборки. В результате обучения нейронная сеть безошибочно сравнивала пары тестовой выборки.

Аналогичную задачу можно решить и для случая, когда функция приспособленности представляет собой линейную свертку большего числа внешних факторов, таких как радиация, температура, концентрация кислорода, концентрация сероводорода и т. п.

Был создан программный комплекс, позволяющий идентифицировать функцию приспособленности для наследственного поведения зоопланктона на основе технологии нейронных сетей. Входными данными для этого комплекса являются функции внешних факторов окружающей среды, заданные в виде числовых массивов или графически. Кроме того, входной информацией являются известные стратегии поведения зоопланктона и порядок сравнения их селективных преимуществ. Такой порядок может быть вычислен по известной динамике численности соответствующих представителей или непосредственно с помощью логического идентификатора «лучше (хуже)». Программа рассчитывает соответствующие значения параметров M, затем осуществляется классификация упорядоченных пар, в результате чего определяются коэффициенты разделяющей гиперплоскости, соответствующие искомым коэффициентам функции приспособленности.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 14.Y26.31.0022).

Литература

1. *Darwin C.* On the origin of species by means of natural selection, or preservation of favoured races in the struggle for life. A Facsimile of the First Edition. Cambridge : Harvard University Press, 1964.

2. *Fisher R.A.* The general theory of natural selection : a complete variorum edition. Oxford : Oxford University Press, 1999.

3. *Haldane J.B.S.* The causes of evolution. Princeton : Princeton Science Library : Princeton : University Press, 1963.

4. *Wright S.* Surfaces of selective value revisited // Am. Nat. 1988. V. 131. P. 115–123.

5. *Dieckmann U., Heino M., Parvinen K.* The adaptive dynamics of function-valued traits // J. Theor. Biol. 2006. V. 241. P. 370–389.

6. *Parvinen K., Dieckmann U., Heino M.* Function-valued adaptive dynamics and the calculus of variations // J. Math. Biol. 2006. V. 52. P. 1–26.

7. *Gorban A.N.* Selection theorem for systems with inheritance // Math. Model. Nat. Phenom. 2007. V. 2(4). P. 1–45.

8. *Kuzenkov O.A., Ryabova E.A.* Limit possibilities of solution a hereditary control system // Differential Equations. 2015. V. 51, № 4. P. 523–532.

9. *Morozov A.Y., Kuzenkov O.A.* Towards constructing a mathematically rigorous framework for modelling evolutionary fitness // J. Theor. Biol. 2016. V. 405. P. 17–28.

10. *Kuzenkov O.A., Kuzenkova G.V.* Optimal control of self-reproduction systems // J. Comput. Syst. Sci. Int. 2012. V. 51, № 4. P. 500–511.

11. *Kuzenkov O., Ryabova E.* Variational principle for self-replicating systems // Math. Model. Nat. Phenom. 2015. V. 10, № 2. P. 115–128.

12. *Kuzenkov O., Morozov A.* Towards the construction of a mathematically rigorous framework for the modelling of evolutionary fitness // Bulletin of Mathematical Biology. 2019. doi.org/10.1007/s11538-019-00602-3.

13. *Clark C.W., Mangel M.* Dynamic state variable models in ecology: methods and applications. Oxford : Oxford University Press, 2000.

14. *Ohman M.* The demographic benefits of diel vertical migration by zooplankton // Ecol. Monogr. 1990. V. 60. P. 257–281.

15. *Wilfried G., Bernhard Th.* Vertical migration of zooplankton as an evolutionarily stable strategy // The American Naturalis. 1988. V. 132, № 2. P. 199–216.

16. *Hays G.* A review of the adaptive significance and ecosystem consequences of zooplankton diel vertical migrations // Hydrobiologia. 2003. № 503 (1). P. 163–170.

17. *Kaiser M.J.* [*et al.*]. Marine ecology: processes, symptoms and impacts. Oxford : Oxford Univercity Press, 2005. 557 p.

18. *Ducklow H., Steinberg D., Buesseler K.* Upper ocean carbon export and the biological pump // Oceanography. 2001. № 14(4). P. 50–58.

19. *Buesseler K., Lamborg C., Boyd P.* [*et al.*]. Revisiting carbon flux through the oceans twilight zone // Science. 2007. V. 316. P. 567–570.

20. *Fiksen O., Giske J.* Vertical distribution and population dynamics of copepods by dynamic optimization // ICES J. Mar. Sci. 1995. V. 52. P. 483–503.

21. *Bollens S.M., Frost B.W.* Predator-induced diel vertical migration a planktonic copepod // J. Plankt. Res. 1989. № 11. P. 1047–1065.

22. *McLaren I.* Effects of temperature on growth of zooplankton, and the adaptive value of vertical migration // J. Fish Board Can. 1963. V. 20(3). P. 685–727.

23. *Pearre Jr.* Eat and run? The hunger/satiation hypothesis in vertical migration : history, evidence and consequences // Biol. Rev. 2003. V. 78. P. 1–79.

24. *Ringelberg J.* Changes in light intensity and diel vertical migration: a comparison of marine and freshwater environments // J. Mar. Biol. Assoc. UK. 1995. V. 75. P. 15–25.

25. *Iwasa Y.* Vertical migration of zooplankton: a game between predator and prey // Am. Nat. 1982. V. 120 (2). P. 171–180.

26. *Morozov A.Yu., Arashkevich E.G.* Towards a correct description of zooplankton feeding in models : taking into account food-mediated unsynchronized vertical migration // J. Theor. Biol. 2009. V. 262(2). P. 346.

27. *Morozov A., Arashkevich E., Nikishina A., Solovyev K.* Nutrient-rich plankton communities stabilized via predator-prey interactions: revisiting the role of vertical heterogeneity // Mathematical Medicine and Biology : a journal of the IMA. 2011. V. 28, № 2. P. 185–215.

Математическая модель передачи информации в процессе обучения

О.А. Кузенков, Г.В. Кузенкова

Институт информационных технологий, математики и механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород; email: kuzenkov_o@mail.ru

Различные математические модели процесса обучения и информационных процессов, связанных с ним, давно привлекают внимание исследователей [1, 2].

Особенно актуальной эта проблематика становится в связи с широким распространением технологий обучающихся искусственных нейронных сетей.

В последнее время значительно возрос интерес к моделированию процессов передачи неврожденной информации в сообществах особей. Такая информация может передаваться путем обучения, подражания и т. п. Этот вид информации был назван «культурным», а соответствующий процесс ее передачи – «культурным наследованием» [3–5].

В работах [6, 7] была рассмотрена модель распространения нескольких видов «культурной» информации в сопоставлении с политической историей Европы. Рассмотренная модель позволяла имитировать процесс территориального распространения национальных культур и национальных языков.

В работе [8] исследован ряд моделей передачи конкурирующих альтернативных видов неврожденной информации. При этом предполагалось, что каждый носитель информации может обладать информацией только одного вида. Была проанализирована долгосрочная динамика количества носителей разных видов информации и установлена возможность отбора одного вида информации.

Данная методика применялась в [9] для исследования модели распространения заболеваний.

Настоящая работа посвящена рассмотрению более общей модели, предполагающей возможность для каждого носителя владеть несколькими видами «культурной» информации. Эта модель, в частности, может описывать процесс языкового обучения и позволяет исследовать динамику количества носителей языка.

Рассмотрим популяцию некоторых особей (людей, животных, искусственных интеллектуальных систем). Предполагается, что численность популяции стабильна во времени. В этом случае общее количество появлений новых особей (рождений) в единицу времени, приходящееся на одну особь, равно общему количеству разрушений существующих особей (смертей) в единицу времени, приходящихся на одну особь. Будем считать это показатель постоянным и равным числу a. Кроме того, считается, что члены популяции могут обладать n различными видами информации, не наследуемой врожденно, а передающейся от особи к особи в процессе обучения, подражания, копирования и т. п. Примером такой информации могут служить различные языки в человеческом сообществе. Очевидно, что вновь появившиеся (родившиеся) особи не обладают никаким видом информации. Пусть x – количество необученных особей, потенциальных носителей неврожденной информации, z_i – количество особей, обладающих только i-м видом информации, z_{ij} – количество особей, обладающих двумя видами информации (билингвов), причем i – первый переданный вид информации (первый язык), j – второй переданный вид информации (второй язык). Считается, что количество особей, обладающих более чем двумя видами информации (полиглотов), пренебрежимо мало. Пусть скорость передачи i-го вида информации (скорость обучения, отражающая, в том числе, привлекательность получаемой информации) от носителей информации к необученным особям пропорциональна произведению их количеств с коэффициентом c_i – $c_i z_i x$ (это предположение соответствует гипотезе «эффективных встреч» в биологии), скорость передачи j-го вида информации к особи, обладающей i-м видом информации, равна $\beta z_i z_j$. С учетом сделанных предположений математическая модель приобретает следующий вид:

$$\dot{x} = -\sum_{i=1}^{n} c_i z_i x + \sum_{i=1}^{n} a z_i + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \neq i} a z_{ij} - \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \neq i} c_i z_{ij} x,$$

$$\dot{z}_i = c_i z_i x - \sum_{j \neq i} \beta z_i z_j - a z_i + \sum_{j \neq 1} c_i z_{ij} x,$$

$$\dot{z}_{ij} = \beta z_i z_j - a z_{ij}.$$

Вводя новую переменную

$$y_i = z_i + \sum_{j \neq i} z_{ij},$$

от исходной модели можно перейти к следующей системе:

$$\dot{x} = -\sum_{i=1}^{n} c_i y_i x + \sum_{i=1}^{n} a y_i,$$

$$\dot{y}_i = c_i y_i x - a y_i.$$

Для исследования полученной системы применяется методика, предложенная в [8], а именно: последовательно выполняются степенная замена переменных

$$\zeta_i = \exp\left(\frac{1}{c_i} \ln y_i\right)$$

и нормирующая замена

$$\xi_i = \frac{\zeta_i}{\sum_{j=1}^{n} \zeta_j},$$

после чего получается следующая система:

$$\dot{\xi}_i = -\frac{a}{c_i}\xi_i + \xi_i \sum_{j=1}^{n} \frac{a}{c_j}\xi_j.$$

Как следует из результатов работы [8], если $c_1 > c_i$, $i = \overline{2,n}$, то при любых начальных условиях, удовлетворяющих неравенству $y_1(0) > 0$, выполняются соотношения $\xi_1(t) \to 1$, $\xi_i(t) \to 0$, $i = \overline{2,n}$, при *t*, стремящемся к бесконечности. Это означает, что с течением времени количество носителей любого вида информации, кроме первого, стремится к нулю; популяция теряет все виды информации, кроме первого.

Полученный результат можно интерпретировать следующим образом: если в сообществе по некоторым социально-экономическим причинам привлекательность овладения одним языком выше, чем другими, то с течением времени все остальные языки в данном сообществе будут потеряны.

На основе рассмотренной базовой модели был исследован ряд ее обобщений, в которых имеет место более сложная динамика численности носителей информации.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 14.Y26.31.0022).

Литература

1. *Поспелов Д.А.* Фантазия или наука: на пути к искусственному интеллекту. М. : Наука, 1982. 224 с.

2. *Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А.* От амебы до робота: модели поведения. М. : Наука, 1987. 288 с.

3. *Turchin P., Currieb Th.E., Turnerc E.A.L., Gavrilets S.* War, space, and the evolution of Old World complex societies // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2013. Vol. 110, № 41. P. 16384–16389. URL: https://www.pnas.org/content/pnas/110/41/16384.full.pdf.

4. *Gavrilets S.* Collective action and the collaborative brain // J. Royal Society Interface. 2015. URL: https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsif.2014.1067.

5. *Шабанов Д.А.* Опровергнута ли теория эволюции? URL: http://evolution.powernet.ru/polemics/shabanov1.htm.

6. *Чернавский Д.С., Чернавская Н.М., Малков С.Ю., Малков А.С.* Математическое моделирование геополитических процессов // Стратегическая стабильность. 2002. № 1. С. 60–66.

7. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. М. : УРСС, 2004.

8. *Кузенков О.А., Рябова Е.А.* Математическое моделирование процессов отбора. Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2007.

9. *Kuzenkov O., Ryabova E.* Variational principle for self-replicating systems // Math. Model. Nat. Phenom. 2015. V. 10, № 2. P. 115–128.

Пролегомены к иному взгляду на природу галлюцинаций, шизофрению и нелинейная динамика

А.А. Кузнецов

email: don.kuznaa@yandex.ru; alex_kuzn@rambler.ru

Психиатрия настоящего времени не знает причин возникновения шизофрении и объясняет ее, исходя из теоретического постулата, что «психические болезни – это болезни мозга». Колоссальное количество накопленных знаний о болезни никак не переходит в новое качество – понимание причинности заболевания и способов ее лечения. Печально, что наукой «проигнорирован» труд гениального В.М. Бехтерева «Будущее психиатрии. Введение в патологическую рефлексологию». Актуален не только его взгляд на роль рефлексов в нормальной жизни человека и возникновении психических болезней, но и понимание, что психически больные люди являются «личностнобольными». Характеризуя последствия болезни, психиатры в любом случае и прежде всего говорят о «личностных» нарушениях, а не о дефекте «души».

Устоявшимся взглядом является понимание слуховых галлюцинаций как «восприятие без объекта». Исследованиями их занималось большое число ученых, однако фундаментальной ясности в предмет изучения им внести не удалось. Не очень понятно даже и то, как слышат шизофреники – хорошо или плохо. Изучал эти явления в рамках диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук Е.Ф. Бажин (1967 г.), который сделал интересные выводы – слуховые галлюцинации связаны с противоречивыми нарушениями слуховой функции. С одной стороны, увеличивались некоторые абсолютные пороги восприятия звука (т. е. больные слышали «хуже»), но снижался дифференциальный порог, что означало, что галлюцинирующие больные оказались способными гораздо тоньше, чем это возможно в норме, дифференцировать звуки различной интенсивности. При этом внешняя среда и ее сигналы остаются вне поля зрения исследователей. О роли внешних сигналов среды свидетельствует замеченное еще И.П. Павловым явление, что больные в кататоническом ступоре начинали правильно отвечать на вопросы, задаваемые тихим голосом, шепотом, в тихой спокойной обстановке. От внимания исследователей слуховых галлюцинаций ускользало, что *мир полон отраженных звуков*. Звуковое поле вокруг нас заполнено причудливым сочетанием прямых волн, отраженных и переотраженных (многократно) волн. Предлагается гипотеза, согласно которой *в основе слуховых галлюцинаций лежит преобладающее восприятие именно слабых отраженных звуковых сигналов*, и, следовательно, речь при слуховых обманах восприятия надо вести не о галлюцинациях, а об иллюзиях. В свое время проницательный В.М. Бехтерев отметил: «…Нет… строгого разделения между иллюзиями и истинными галлюцинациями» [1].

Слуховая система в норме воспринимает прямые звуки от их источника раньше отраженных звуков. Прямые и ранние отраженные сигналы приписываются их источнику, сливаются с ним (эффект Хааса). В норме прямые звуки и их ранние отражения служат сигналом, несущим информацию, а поздние отраженные звуки образуют фон, на котором мозг воспринимает эту информацию. Отраженные сигналы дают мозгу информацию об акустической среде, в которой развертывается действие. При патологии (слуховые галлюцинации) мозг настраивается на преимущественное восприятие отраженных звуков, изменяя тем самым временн**у**ю структуру самого восприятия. Фокус активного внимания сдвигается по оси времени на восприятие более поздних по отношению к прямым волнам слабых отраженных звуковых волн. Но именно восприятие фона в естественных условиях дает понимание контекста происходящего. Научным сообществом не подвергается сомнению, что при шизофрении нарушается понимание контекста происходящего. Происходит нечто подобное иллюзии, когда у пассажира, сидящего в вагоне неподвижного поезда и не видящего перрона, возникает ощущение, что его поезд тронулся, если в окне виден другой состав, который, в действительности, начал свое движение.

При галлюцинациях у больных нарушается и восприятие разборчивости речи. Разборчивость речи как частного случая звукового сигнала определяется разрешающей способностью слуха (частотной и временн**о**й). Мозг больного на обработку каждого из звуковых сигналов окружающей среды использует меньший временной интервал по сравнению с нормой, т. е. имеет лучшую временную разрешающую способность, но худшую частотную. В этих условиях сигналы извне будут неправильно распознаны, идентифицированы.

Известен научный факт, описанный еще в 1970 г. Р. Уорреном из Висконсинского университета и названный им фонетическим восстановлением, когда *более поздний звуковой сигнал влияет на восприятие более раннего сигнала***.** Представляется разумным объяснить этим явлением и содержание галлюцинаторных «голосов». Воспринимая реально существующие затухающие вследствие физических свойств воздуха отраженные звуковые сигналы, мозг больного начинает реформировать (с учетом их) модель существующей действительности, порождая бредовые построения. В настроенном на восприятие отраженных сигналов мозге больного шизофренией неправильно оцениваются физические параметры сигналов. Иными словами,

поражается этап слухового восприятия под названием «последовательность», нарушается процесс простейшего временного анализа событий.

Рискну утверждать, что любой человек (без признаков малейшей психической патологии) в состоянии услышать слуховые галлюцинации. Для этого достаточно прослушивать беглую речь в какой-либо радиопрограмме, с помощью компьютера вводя дополнительно к основному звуковому потоку поток тех же звуков с задержкой дополнительного сигнала по времени. При этом послезвучание ранее произнесенного слова накладывается на звучание следующего слова и т. д., порождая своеобразный фоновый гул, среди которого можно услышать отдельные неясные звуки, слоги, отдаленно напоминающие какие-либо слова. Возникает ощущение объемного гулкого пространства. Слушатель теряется в этом объеме, начинает невольно озираться по сторонам. Звуки музыкальных инструментов слышатся сочными, объемными, с обогащенным тембром. Нечто подобное описано и производителями программы Daqarta, служащей для сбора данных и анализа сигналов в реальном времени (http://daqarta.com/dw_yypp.htm).

Сложно понять возникновение зрительных галлюцинаций, если подходить к механизму зрительного восприятия с позиций классической физиологии, которая утверждает, что на сетчатке глаза возникает перевернутое изображение видимого объекта. Как объяснил А.М. Хазен, на сетчатке глаза не может быть никакого изображения вообще, поскольку ориентированы светочувствительные элементы сетчатки (палочки и колбочки) в сторону противоположную свету, и мы видим не объекты, а распределения частот видимого спектра, которые обусловлены взаимодействием света и наблюдаемого объекта [2].

Установлено, что у шизофреников иной алгоритм рассматривания предъявляемого визуального ряда (распределение точек фиксации взгляда значительно отличается от такого в норме) [3]. С помощью плавных движений глаз в норме зрительная система человека настраивается на центр видимого сигнала. Вероятно, подобный алгоритм отбора зрительных сигналов среды является своего рода приспособительной реакцией мозга на возникшие сенсорно-перцептивные нарушения.

Об имеющихся сенсорных нарушениях при шизофрении свидетельствуют и исследования И.И. Шошиной, которыми установлено рассогласование работы магно- и парвоцеллюлярных систем мозга при шизофрении [4]. Изучение зрительных иллюзий в норме и при шизофрении основывается на представлении, что зрительные иллюзии являются неотъемлемой частью зрительного восприятия и отражают работу фундаментальных механизмов формирования зрительного образа. Ряд исследователей (Schwartz, Butler) отмечают разнообразные нарушения работы сенсорных систем при шизофрении: восприятие формы, ориентации, контраста, пространственной локализации и проч. Другие ученые (Phillips, Silverstein) полагают, что целостность восприятия, как и иные когнитивные проблемы при шизофрении, обусловлена невозможностью установления последовательности контекстно взаимосвязанных раздражителей. С.А. Карелиным с соавторами доказано, что при шизофрении имеет место ускорение переработки сенсорной информации, которое авторами объясняется нарушением тормозных механизмов сенсорной фильтрации [5].

Необходимо обратить внимание, что *способность следить плавными движениями глаз* за перемещающимися в пространстве предметами мозгом шизофреника не утрачена, она лишь *не используется* (!). Данное явление широко известно психиатрам. Однако объяснить его как результат «неисправности» процессов высокого уровня с точки зрения когнитивных (нисходящих) процессов регуляции невозможно. Надо учитывать, что восприятие – это автоматизированный, закрепленный рефлекторно процесс, не требующий нисходящего контроля со стороны сознания. Этот факт подтверждает взгляд автора, что при шизофрении имеет место именно иная функциональная настройка сенсорных систем организма на восприятие физических сигналов среды, а не «поломка» неких систем мозга.

Особым видом галлюцинаций в психиатрии считаются так называемые псевдогаллюцинации, имеющие две особенности – локализацию внутри головы больного и ощущение «сделанности», «чуждости». Локализация псевдогаллюцинаций объясняется тем, что в оба уха звуковая волна приходит одновременно (в одной фазе).

Подобный взгляд на природу слуховых обманов восприятия приводит к выводу, что *шизофрения есть расстройство временной обработки мозгом сигналов*. Шизофренические проявления – это нарушение обработки информации, поступающей в мозг больного из внешней среды и организма. При этом полагается, что мозг – это естественная нейронная сеть, служащая лишь для передачи и обработки информации, сеть, защищенная от помех, устойчивая по качеству связи и дублированию. Г. Хакен рассматривает мозг как сложную систему вблизи критического состояния и как генератор случайных режимов [6]. Активность мозга лишь модулируется сигналами (звуковыми, световыми и др.) извне. Можно сказать, что мозг человека своего рода вычислитель, строящий модели окружающего на основе данных, переданных ему органами чувств. Сам же процесс настройки мозга на восприятие преимущественно отраженных сигналов имеет характер фазового перехода, аналогичного известным экспериментам S. Kelso по координации движений пальцев.

В подобном взгляде на шизофрению подкупает возможность простых объяснений известных фактов о болезни, которые никак не объясняются наукой, считаясь некими курьезами. Так, феномен «некритичности больных к своему состоянию» легко объясним с точки зрения излагаемого здесь взгляда на шизофрению как на нарушение обра-

ботки физических параметров сигналов, поскольку «низовая», первичная обработка звуковых сигналов среды мозгом осуществляется на «дососознательном» уровне. Объяснение известных практикам сезонных весенне-осенних всплесков шизофрении заключается в высокой степени отраженных звуковых сигналов во влажном воздухе, максимальной именно в эти периоды. Нет убедительного объяснения известным фактам, когда шизофреники с «многолетним стажем» пребывания в стационарах в случаях экстремальных ситуаций (пожар, наводнение, война), словно забывали о своих проблемах и действовали абсолютно нормально, т. е. адекватно ситуации. С точки зрения предлагаемого здесь взгляда на шизофрению как на нарушение временной обработки мозгом сигналов это явление объясняется тем, что для новой обстановки у шизофреника нет готовых алгоритмов обработки поступающих новых сигналов и поэтому новая обстановка воспринимается адекватно.

Высшие отделы слуховой системы (включая слуховые зоны коры) обычно рассматривают как логический процессор, выделяющий полезные звуковые сигналы, группирующий их по признакам, сравнивающий с образами в памяти, определяющий их ценность и принимающий решение об ответных действиях. В то же время структура периферического отдела слуховой системы человека для проявления подобной патологии имеет необходимые и достаточные условия. Улитка внутреннего уха служит микрофоном, частотно-временным анализатором и аналого-цифровым преобразователем, и, кроме того, наружные волосковые клетки подходят на роль активных усилителей сигналов [7]. Искажение восприятия звука касается и восприятия собственного тела. Нарушение времени восприятия слуховых сигналов становится критическим фактором в разрушении обратной связи организма со средой и через нее навыков каких-либо действий.

В контексте излагаемых взглядов условные рефлексы рассматриваются (наряду с оперантным научением) как система обучения мозга обработке сигналов по переводу любых новых навыков в автоматические. Вспомним, что еще И.П. Павлов мечтал объяснить шизофрению с позиции временных связей. Давно известен факт нарушенной деятельности при шизофрении ориентировочного рефлекса, играющего существенную роль в восприятии. «Ориентировочные рефлексы дают возможность ориентировки индивида в окружающем мире и вместе с тем, как упоминалось выше, устанавливают приспособление раздражаемого органа в одних случаях для наилучшего использования подходящего раздражителя, а в других – для отвергания или ослабления неподходящего по своей силе или качеству раздражителя» [1].

Современные взгляды на обучение мозга восприятию сигналов внешней среды заключаются в изменении силы синаптических контактов и локальных свойств распределенных нейронных сетей. В мозге идут непрерывные процессы самоорганизации и перестройки таких функциональных сетей. Надо иметь в виду пластичность мозговых процессов, их обратимость. Особую роль в этом имеет сенсорная реабилитация [8].

Если уподобить мозг шизофреника телевизионному приемнику и искать в нем неисправность, логично предположить, что неисправен тюнер, т. е. устройство, настраивающее аппарат на принимаемый сигнал. Если «ширина окна» тюнера будет не совпадать с временн**о**й разверткой сигнала, то на выходе аппарата будет не изображение и синхронный звук надлежащего качества, а их искаженные версии, даже если все остальные блоки телевизионного приемника абсолютно исправны. Так и мозг, настроивший свои сенсорные системы преимущественно на восприятие запаздывающих по времени, отраженных звуковых сигналов, будет неверно интерпретировать всю окружающую его среду. Именно здесь, как представляется, кроется та неисправность мозга больных шизофренией, которую безуспешно пытаются связать с причиной шизофрении ученые.

Психиатры при определении у пациента признаков психических отклонений используют, среди прочего, тест на определение скрытого смысла в метафорах, пословицах и поговорках, под которым понимается способность использовать в жизни *образное* мышление. Образное мышление в данном случае есть не что иное, как участие в обработке сигналов так называемого эмоционального полушария (чаще всего это правое полушарие). Образное мышление в данном случае подразумевает свой аналоговый характер**.** *Основное отличие аналогового сигнала от цифрового сводится к характеру поведения сигнала во времени – это непрерывное изменение в первом случае и дискретное (прерывистое) во втором***.** Наука не знает, как кодируются сигналы в мозге – в аналоговой форме или же в цифровой. Японские исследователи из Университета Киото считают, что разные части мозга используют разные формы кодирования [9]. Наблюдения за больными позволяют сделать вывод, что преобладающим способом обработки сигналов внешней среды мозгом шизофреника является цифровой способ.

Необычайная устойчивость патологических процессов в мозге психически больного наводит на мысль, что эти процессы должны быть связаны с некими очень устойчивыми явлениями. Таковыми представляются свитковые (по аналогии со свернутым листком бумаги – свитком) волны – автоволны. Именно они являются причиной фибрилляций и аритмий сердца и применительно к организму человека изучались на этом органе. Распространение автоволн поддерживается за счет распределенных источников энергии (например, волны возбуждения в сердце).

Известны попытки моделирования психических расстройств, в частности биполярного расстройства, с точки зрения нелинейной динамики. Разработка математических моделей смены эмоциональных состояний при патологии остается редкой областью приложения нелинейной динамики (Д.Д. Постнов [10]), несмотря на их важ-

ность. Представляется целесообразным, с учетом сложности объекта исследования, подобрать, как и автор упомянутого исследования, математическую модель, поведение которой сходно с имеющимися данными о болезни. Таковой представляется на первый взгляд широко известная модель странного аттрактора Лоренца.

Предлагаются следующие направления исследований в области психофизиологии сенсорного восприятия и нелинейной динамики, проясняющие процесс обработки мозгом сигналов внешней среды: изучение временной разрешающей способности слуха при шизофрении и особенностей восприятия больными эффекта Хааса; роль фликкер-шума в распознавании образов при шизофрении; подбор математической модели, дающей более точный фазовый портрет состояний при шизофрении.

Литература

1. *Бехтерев В.М.* Будущее психиатрии. СПб. : Наука, 1997. С. 260, 120.
2. *Хазен А.М.* Разум природы и разум человека. М., 2000.
3. *Зотов М.В., Андрианова Е.Н., Попова Д.А., Санина М.В.* Процессы категоризации в восприятии невербальной коммуникации // Седьмая Международная конференция по когнитивной науке. Светлогорск, 20–24 июня 2016 г.
4. *Шошина И.И.* Локальный и глобальный анализ изображений в норме и при шизофрении : дис. ... докт. биол. наук. 2014. С. 6, 250–252.
5. *Карелин С.А. [и др.]*. Мозговые механизмы нарушения саккадических движений глаз и когнитивных расстройств при шизофрении. URL: https://neurobiology.ru/doc/index.php?ID=64.
6. *Хакен Г.* Принципы работы головного мозга. М. : Per Se, 2001. С. 75.
7. Физиология человека. Т. 1. М. : Мир, 1996. С. 292.
8. *de Villers-Sidani E. [et al.]*. Lifelong plasticity in the rat auditory cortex: basic mechanisms and role of sensory experience // Prog. Brain Res. 2011. V. 191. P. 119–131.
9. *Mochizuki Y., Shinomoto Sh.* Analog and digital codes in the brain // Phys. Rev. E. 2014. V. 89. Art. 022705.
10. *Постнов Д.Д.* Эволюционная стохастическая модель динамики психоэмоциональных состояний при аффективных расстройствах // Изв. вузов. ПНД. 2010. Т. 18, № 4. С. 148–159.

Антропологический механизм передачи знаний от поколения к поколению

Г.В. Лосик[1], И.М. Бойко[1], С.В. Петров[2]

[1]Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск; email: georgelosik@yahoo.com
[2]Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, Минск; email: psv906@mail.ru

Введение

В исследовании психики человека остается не решенной проблема, как от поколения к поколению передаются присущие сугубо человеку способности к юмору, рефлексии, тщеславию, гордыне, зависти, альтруизму, амбивалентности чувств, способность взглянуть на себя со стороны. Известные механизмы передачи информации, такие как генетический, социального научения, словесный канал связи, не позволяют объяснить передачу этих способностей. Подобную информацию нельзя назвать смысловой, поскольку по своей сути она не имеет целесообразности для материального выживания человека как вида. Тем не менее передача по наследству этих способностей каким-то образом происходит. Можно упрощенно считать, что возможно только социальное научение в рамках теории Альберта Бандуры [2], а обучение детьми взрослых членов социума невозможно.

В настоящей работе рассматривается еще один возможный механизм передачи информации от поколения к поколению, особенностью которого является возможность передавать информацию о моральном, нравственном, культурном взаимодействии людей в социуме. Это механизм передачи сугубо образной информации, информации на уровне поведения человека, а не мышления и идей. Он назван антропологическим и является самостоятельным, отличным от генетического, социально-подражательного и вербального механизмов передачи информации. Если вскрыть механизм этой передачи (алгоритм кодирования), мы сможем лучше понять, как наследуется в филогенезе психики человека способность передавать от поколения к поколению информацию о высших психических функциях.

Известные механизмы передачи информации от поколения к поколению

Генетический механизм передачи информации от поколения к поколению заключается в накоплении и сохранении в памяти человека новых приспособительных поведенческих приемов, кодировании их в ДНК нервных клеток, затем в хромосомах и половых клетках.

Механизм социального научения Альберта Бандуры. Известен механизм социального научения, по которому новое поколение людей усваивает знания о принятых в окружающем их социуме правилах поведения и общения, отношения к вещам, культурным, материальным, духовным и социальным ценностям [1]. По этому каналу методом подражания образной информации последующее поколение усваивает от представителей предыдущего поколения распространенные образцы пантомимики, мимики, жестов, походки, позы, произношения и др. Вместе с образной информацией ребенок усваивает из социума устоявшиеся в нем мнения, взгляды, оценки, базовые философские, математические, физические, химические понятия и законы. Подражанием усваиваются устоявшиеся суждения, умозаключения, методы и технологии, которые демонстрирует окружающий социум.

Механизм передачи информации посредством речи. Самым востребованным в наши дни стал канал поступления знаний, выработанных предыдущими поколениями, в текстовом виде. Это тексты, схемы, чертежи, таблицы, диаграммы – все то, что можно оцифровать. Таким образом обеспечивается возможность, используя цифровые (информационные) каналы передачи данных, не ограничиваться знаниями от предыдущего поколения, а объединять знания от целого ряда поколений.

Антропологический механизм передачи по наследству информации о нравственных принципах

Проблема формирования морально-нравственных свойств человека. Как известно, в генетике пока не выявлено генов в хромосоме человека, хранящих информацию о морально-нравственных свойствах человека и обеспечивающих в онтогенезе возможность инстинктивных действий, формирующих у ребенка высшие психические функции [3]. Поэтому сегодня психологи, педагоги и социологи полагают, что высшие психические функции (воля, речь, вербальное мышление, самосознание, альтруизм и эмпатия) формируются у человека в ходе социального научения, подражания ребенка социуму, в ходе овладения текстовой информацией. Считается, что эти черты формируются путем словесного разъяснения, внушения, логического убеждения, наказания, устрашения. Отдельного специального канала передачи информации ученые не выделяют.

Тем не менее в настоящей работе рассматривается еще один теоретически возможный механизм передачи информации от поколения к поколению, отличающийся от уже известных возможностью кодировать информацию о взаимодействии людей друг с другом и называемый моральным, нравственным либо культурным. С точки зрения кибернетики рассматриваемый авторами механизм априори возможен только в случае физического сходства двух человек: и передающего информацию (предыдущего поколения), и прини-

мающего информацию (последующего поколения). Обнаруженный механизм правомерно считать антропологическим, поскольку такая передача информации связана с обязательным проведением проверочного эксперимента. Ребенок устраивает проверку тех морально-нравственных принципов, которые ему предлагает социум. В этих принципах неизбежно уже содержится культурно-историческая и социальная информация. Но новое поколение не автоматически следует принципам предыдущего поколения, не берет их сходу в использование, а устраивает натурный эксперимент по проверке антропологической (видовой) целесообразности данных принципов.

Доказательство возможности антропологического механизма. В предыдущих работах [5, 6] речь шла об известном факте, что у человека от поколения к поколению сохраняются постоянные видовые и наследственные признаки. В соответствии с кибернетическими принципами кодирования это условие постоянства не является обязательным для передачи сообщения. В противовес такой точке зрения авторы поставили цель выяснить возможность извлечения получателем сообщения информации о передатчике благодаря сходству их физического строения. Если приемник сообщения имеет сходное строение с передатчиком сообщения, то информацию о вариативности сообщения приемник может узнать не от источника сообщения, а без него, сам, из своего физического строения. Такое возможно, потому что варианты искажения в образном восприятии приемника в случае сходства его с передатчиком всецело повторяют варианты физической изменчивости передатчика.

Благодаря эксперименту, ранее сформированные в сенсорной сфере ребенка нормы нравственного поведения социума обогащаются новой информацией. Это информация уже не о самих норах, а о *степенях свободы* норм. Таким образом, информация о нравственных принципах усваивается не только за счет прямого подражания окружающим, как принято считать, а и из факта антропоморфного сходства строения носителя информации у передатчика и у приемника.

Доказательство существования механизма возникновения антропологической информации. Наиболее ярко механизм возникновения дополнительной информации иллюстрируется схемой социализации ребенка Л.С. Выготского, рассмотренной в работе [3]. Вместе с тем данный кибернетический механизм обнаруживает себя в ряде иных психологических феноменов, которые сегодня трактуются без ссылки на открытый нами механизм. Для доказательства существования этого механизма был проанализирован ряд следующих феноменов и в них выявлены пять обязательных условий этого механизма. Была проанализирована субкультура детского сада, принципы Марии Монтессори в сенсорном обучении ребенка, субкультура семьи, гражданского брака, субкультура школы, драматического театра, церковная субкультура, армейская субкультура [4]. Во всех указанных субкультурах найдено подтверждение реализации завуалированного алгоритма, образующего механизм поступления в психику человека антропологической информации.

Метод выдвижения встречных гипотез как альтернатива статистическому методу. Рассмотренный частный случай передачи информационного сообщения от передатчика к приемнику можно рассматривать как случай, при котором не используется статистический метод накапливания человеком сведений о внешнем явлении, а используется метод выдвижения встречных гипотез. Статистика отражает законы поведения и формы неодушевленной материи, окружающей человека. Эту информацию психический образ, безусловно, аккумулирует в себе. Но в своем «поведении» неодушевленная материя не содержит информации о целях, функциях движений тех материальных объектов, которые кодируются в виде *мотивов* человека. Антропологию смыслов поведения человека можно узнать, узнав его мотивы. Но мотивы – это суть ментальные явления и их изучение вовне «объективными», статистическими методами не достоверно.

Поэтому человек-приемник, он же ребенок, с точки зрения кибернетики применяет иной метод распознавания мотива: он выдвигает встречные гипотезы в адрес человека-передатчика, гипотезы о его мотивах. И проверяет гипотезы тремя путями: пассивно наблюдая поведение другого человека, активно нанося на него, когда он собеседник, перцептивные воздействия и, наконец, путем физического моделирования другого человека на самом себе. Во всех этих трех случаях используется, что важно, не статистическое усреднение внешних для психики сигналов по принципу условного рефлекса, а метод выдвижения встречных гипотез [7]. Именно за счет этого становится возможно декодирование сугубо антропологической, а не иной информации из воспринимаемого сообщения [8]. Именно этот механизм объясняет передачу предыдущим поколением людей последующему информации о высших психических функциях человека [3].

Заключение

1. Выявлен еще один канал передачи информации, знаний – от поколения к поколению у человека. Это, по сути, *антропологический* канал передачи информации. Он не связан с подражанием социальному опыту. Это не генетический канал передачи информации. Выявленный канал суть алгоритм, который реализуется строго при определенных жестких условиях. Данный канал существует в виде физического механизма переноса от поколения к поколению морально-нравственных принципов поведения человека как вида, переноса высших психических функций человека.

2. Подражание социуму оставляет детей на уровне зазубривания социальных категорий. Высокие чувства формируются не через подражание,

как принято считать, а через «выдвижение встречных гипотез». В человеке как в представителе человеческого рода заложены лишь интенции к высшим психическим функциям. Ребенок, подросток, копируя механически поведение взрослых, сам закладывает в их поступки высокие смыслы, сам пробует видеть свою игру через призму высокочеловеческих чувств. Таким образом, ребенок, подросток даже способен возродить в социуме высшие психические функции, когда они временно почему-то уменьшились.

3. Суть выявленного психологического феномена состоит в том, что в перцептогенезе человека реализуется алгоритм, который позволяет подростку получать информацию о социуме не из наблюдения социума, а путем проведения особого эксперимента над самим собой по изучению степеней свободы своей нравственной сферы. Этот алгоритм может реализоваться только у человека и только *в частном случае*, когда передатчиком сообщения является не социум, а один отдельный человек, а приемником – другой человек. В иных случаях при передаче сообщений этот механизм кодирования *a priory* не возможен.

Литература

1. *Аллахвердов, В.М.* Сознание в логике познания / В.М. Аллахвердов // Материалы пятой Международной конференции по когнитивной науке. Калининград, 2012. 216 с.

2. *Бандура, А.* Теория социального научения / А. Бандура. СПб. : Евразия, 2000. 320 с.

3. *Выготский, Л.С.* Психология развития человека / Л.С. Выготский. М. : Эксмо, 2005. 1136 с.

4. *Ильинова, К.В.* Влияние сюжетно-ролевой игры на формирование личности ребенка / К.В. Ильинова, О.Ю. Логвинова, С.В. Мещерякова, И.Ю. Кулько // Молодой ученый. 2014. Вып. 17. С. 487–489.

5. *Кравцова, Е.Е.* Неклассическая психология Л.С. Выготского / Е.Е. Кравцова // Национальный психологический журнал. 2012. Вып. 7. С. 61–68.

6. *Лосик, Г.В.* Кодирование информации в мозге / Г.В. Лосик. Минск : Lap Lambert Academic Publishing, 2015. 135 с.

7. *Лосик, Г.В.* Перцептивные действия человека: кибернетический аспект / Г.В. Лосик. Минск : ОИПИ, 2008. 147 с.

8. *Пиаже, Ж.* Роль действия в формировании мышления / Ж. Пиаже // Вопросы психологии. 1965. Вып. 6. С. 8–12.

Конкуренция за ресурс дифференциации в процессе формирования психологических структур

Н.Е. Максимова[1], И.О. Александров[1], Ю.А. Заварнова[2],
В.С. Свиридов[3], Д.С. Турубар[4]

[1]Институт психологии РАН, Москва; email: almax2000@inbox.ru

[2]ВПО ГАУГН, Москва; email: juliazavarnova@mail.ru

[3]Федеральный медицинский исследовательский центр психиатрии и наркологии МЗ РФ, Московский НИИ психиатрии; email: psyastral@mail.ru

[4]Национальный научно-практический центр детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Дм. Рогачёва, Москва; email: dturubar@gmail.com

Выявление наиболее фундаментальных характеристик процессов дифференциации – одна из центральных проблем изучения организации психологических структур (ПС).

ПС рассматривается как совокупность информационных моделей взаимодействия индивида с различными составляющими определенной институционализированной предметной области (ИПО) [3]. Информационные модели взаимодействия с ИПО представляют собой компоненты ПС индивида, связанные отношениями различных типов, которые определяют последовательность актуализации компонентов ПС (группа диахронических отношений следования строгого и нестрогого порядка и различные варианты их повторной актуализации – петли и циклы), а также состав наборов одновременно актуализированных компонентов (группа синхронических отношений, обозначенных логическими операторами AND, XOR и IOR) [1, 2]. Отношения между компонентами формируются как результат дифференциации организации взаимодействующих компонентов ПС. Каждый компонент может сформировать отношения всех типов с множеством других компонентов, т. е. потенциально способен неоднократно пройти все ветви древа дифференциации (см. [2, 5]). Установлено, что специфика соотношения компонента ПС относительно определенного цикла взаимодействия с ИПО (информационная модель взаимодействия с определенной составляющей ИПО) фиксируется как общая специализация группы нейронов в этом цикле (поведенческом акте). Информационные модели взаимодействия компонента ПС с другими компонентами фиксируются на группе нейронов с общей (основной) специализацией как дополнительные специализации – для каждого из сформированных циклов взаимодействий [1, 2, 4]. Потенциал порождения информационных моделей взаимодействий данного компонента с другими, т. е. ресурс дифференциации компонента, ограничен, по-видимому, предельным количеством дополнительных специализаций на каждом нейроне, входящем в группу, которые фиксируют все вновь сформированные модели взаимодействий с другими компонентами ПС [1, 2].

Целостная ПС может быть описана как сложная неоднородная семантическая сеть [7], вершины которой представляют компоненты ПС, а дуги – отношения между ними. На сети определяются подмножества, образованные отношениями различного типа (следования, AND, XOR и IOR). Показано, что в подмножествах сети, сформированных синхроническими отношениями, существуют группы вершин сети, которые описываются непланарными графами K_5 и $K_{3,3}$ [8], причем графы K_5 образованы отношениями AND, а $K_{3,3}$ – более дифференцированными отношениями XOR и IOR [5, 6]. Установлено, что группы компонентов, связанные как графы K_5 и $K_{3,3}$, распределены в популяции неравномерно. Графы $K_{3,3}$ формируются в бóльших количествах у лиц, показывающих бóльшую эффективность в решении тестовых задач, в то время как графы K_5 более характерны для лиц, решавших тестовые задачи с меньшей эффективностью, либо отказывавшихся от их решения [5, 6]. Важно заметить, что графы K_5 и $K_{3,3}$ формируются на подмножествах сети, образованных отношениями AND и XOR и пересекающихся по составу компонентов. Можно предположить, что в реципрокном характере их соотношения проявляется конкуренция за ресурс порождения информационных моделей взаимодействий, представленных отношениями двух типов (AND и XOR).

Цели работы: охарактеризовать соотношение процессов порождения отношений AND и XOR, оценить устойчивость этого соотношения на разных этапах формирования ПС и связь этого соотношения с образованием непланарных групп компонентов K_5 и $K_{3,3}$; сравнить такое соотношение для участников исследования из популяционной выборки и выборки пациентов с расстройствами шизофренического спектра.

Гипотезы исследования: 1) информационные модели взаимодействий между компонентами ПС (AND и XOR) формируются на основе общего ресурса; 2) конкуренция за ресурс дифференциации проявляется на самых ранних этапах формирования ПС в данной ИПО (альтернативное положение: конкуренция создается на поздних этапах формирования ИПО).

Методика

В исследовании приняли участие 158 человек. Популяционная выборка – 118 чел. (66 женщин, 52 мужчины, 17–40 лет, медиана = 21 год); паци-

енты с расстройствами шизофренического спектра – 40 чел. (18 женщин, 22 мужчины, 18–59 лет, медиана = 30 лет); диагнозы по МКБ-10: F20 (шизофрения) – 21 чел., F21 (шизотипическое расстройство) – 10 чел., F25 (шизоаффективное расстройство) – 9 чел.

Участники исследования формировали компетенции в двух ИПО: в стратегической игре «Крестики-нолики на поле 15×15» (XO) (300 ходов в последовательных играх) [1] и в решении задач методики «Ход шахматного коня» (ХШК) [5, 6]. Участники исследования, прошедшие все процедуры (популяционная выборка 118 чел., выборка пациентов – 23 чел.), были разделены на 7 групп (0–6). Пациенты, решавшие все задачи всех серий ХШК, составили группу 1; отказавшиеся от решения этих задач на каком-либо этапе после получения инструкции, составили группу 0. Популяционная выборка кластеризована на 5 групп, по использованию одного из 5 вариантов семантики решения задач ХШК [5, 6], так, что наиболее успешные участники составили группу 6, а наименее успешные (отказавшиеся от решения, использовавшие семантику-1) – группу 2. Группы 0 и 1 (выборка пациентов) и 2 и 3 (популяционная выборка) созданы аналогично результатам кластеризации с целью разделения участников из популяционной выборки и пациентов. Четыре пациента, вошедшие в группы 3–6, были исключены из анализа. Подробное описание разбиения выборки на группы см. в [5, 6].

Строили количественное описание ПС, сформированной при приобретении компетенции в стратегической игре XO, используя процедуры, описанные в [1, 5]. В работе использованы переменные, фиксирующие количество сформированных отношений AND и XOR на интервале от 1-го до 300-го хода игры, а также суммарное количество отношений между компонентами, которые образуют непланарные составляющие сети: AND, связывающих графы K_5, а также XOR, связывающих графы $K_{3,3}$. Методику выявления непланарностей см. в [5, 6].

Множество кривых, описывающих формирование отношений XOR и AND, разделяли на 4 группы по соотношению количества этих отношений для последовательности интервалов оси «Номер акта игры» 10, 15, 20, 25, ..., 220 актов (эпоха анализа была ограничена 220 актами на основании предварительных оценок изучаемого соотношения). Группу 1 и 2 составляли кривые, характеризующие формирование отношения XOR, при условии, что в определенном интервале их количество превышает количество сформированных отношений AND (группа 1) или не превышает их количество (группа 2). В группы 3 и 4 вошли кривые, описывающие формирование отношений AND: группа 3 – для отношений AND, при условии, что их количество на данном интервале превышает количество отношений XOR, а группа 4 – при условии, что количество отношений AND не превышает количество отношений XOR. Определяли соответствие момента достоверного расхождения групп кривых 1 и 2, а также групп кривых 3 и 4 какому-либо интервалу по оси «Номер акта игры». Для определения момента достоверного расхождения медианных значений для групп кривых 1 и 2, 3 и 4 применяли критерий непересечения зон их межквартильного размаха для каждого из выделенных интервалов оси «Номер акта игры». С этой целью использовали также 95 % доверительные интервалы аппроксимаций кривых групп 1–4, построенных при помощи процедуры нелинейной регрессии. Для аппроксимации кривых использовали комбинированное выражение

$$Y = b \cdot N^c + e^{(d+\frac{f}{N})}, \qquad (1)$$

где Y – моделируемый параметр, N – время, оцененное в совершенных актах игры (ось «Номер акта игры»), e – основание натуральных логарифмов.

Для определения моментов начала процессов формирования отношений AND и XOR кривые анализировали на последовательности актов игры 1÷50.

Данные обрабатывали с помощью пакета SPSS Statistics 17.0.

Результаты

Наиболее ранние проявления формирования отношений отмечены для отношения AND – на втором акте игры, медианные значения кривой отклоняются от нуля на 13-м акте игры. Отношения XOR начинают формироваться позже, впервые они появляются на четвертом акте игры; медианные значения кривой отклоняются от нуля на 27-м акте. Наиболее раннее достоверное расхождение кривых групп 1 и 2 (отношения XOR) отмечено в интервале акта игры 25 (см. рис. 1, А), хотя, начиная с акта игры 150, значения 1-го квартиля группы кривых 1 несколько перекрываются значениями 3-го квартиля группы кривых 2.

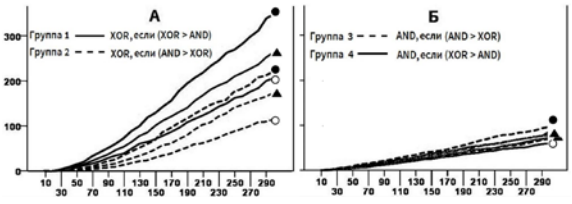


Рис. 1. Соотношение процессов формирования отношений XOR (А) и AND (Б). По оси абсцисс – номер акта игры. По оси ординат – количество сформированных отношений XOR (А) и AND (Б). Треугольники – медианы распределений, светлые кружки – 1-й квартиль, темные кружки – 3-й квартиль

Для групп кривых 3 и 4 (отношения AND) перекрытие длится до 300-го акта игры – первый квартиль кривой 3 перекрывается с третьим квартилем кривой 4 так, что медианные значения оценок для групп кривых 3 и 4 несколько расходятся только после 200-го акта игры (рис. 1, Б).

При выполнении условия, что на интервале какого-либо акта игры отношений AND формируется больше, чем отношений XOR, количество образующихся отношений XOR оказывается сни-

женным на всем протяжении формирования ПС (сравнение групп кривых 2 и 3 для интервала 75-го акта игры показано на рис. 2, Б). При инверсии соотношения количеств формирующихся отношений XOR и AND, т. е. при условии, что на интервале какого-либо акта игры отношений XOR формируется больше, чем отношений AND, достоверного снижения количества образующихся отношений AND не выявлено (сравнение групп кривых 1 и 4 для интервала 75-го акта игры показано на рис. 2, А). Описанные соотношения можно видеть и на рис. 1, но для интервала 45-го акта игры.

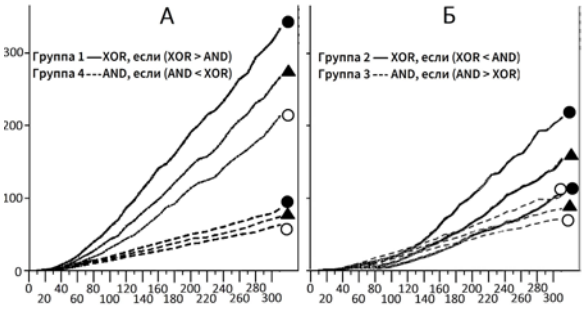


Рис. 2. Асимметрия соотношения процессов формирования отношений XOR и AND. По оси абсцисс – номер акта игры. По оси ординат – количество сформированных отношений XOR или AND. Треугольники – медианы распределений, светлые кружки – 1-й квартиль, темные кружки – 3-й квартиль

Построение нелинейных регрессионных моделей сравниваемых кривых показало их достоверное различие (что позволяет скорректировать оценку по пересечению межквартильного размаха распределений на всем протяжении кривых). Сравнение групп кривых 1 и 2 (см. рис. 1, А) показало, что 95 % доверительные интервалы коэффициента c степенной части комбинированного уравнения (1) для моделей этих групп кривых не пересекаются (кривые группы 1: R^2 = .726; c = = 1.021 (1.018÷1.024); группы 2: R^2 = .632; c =.981 (.976÷.985)). Аналогичный результат получен при моделировании групп кривых 3 и 4 (см. рис. 1, А): кривые группы 3: R^2 = .752; c =.827 (.825÷.830); группы 4: R^2 = .845; c =.790 (.788÷.791). Достоверное расхождение групп кривых 1 и 2, 3 и 4 показано также при использовании критерия Манна – Уитни (приводим оценку для интервала 275-го акта игры); кривые 1 и 2: Z = –5.08; $p = 3.75 \cdot 10^{-7}$; кривые 3 и 4: Z = –12.27; $p = 1.34 \cdot 10^{-34}$.

Соотношение количества отношений XOR и AND, которые формируются при выполнении условий, зафиксированных в группах кривых 1, 2, 3 и 4, с высокой точностью воспроизводится в характеристиках непланарных составляющих сетевой организации ПС – содержащих непланарные графы $K_{3,3}$, которые образованы отношениями XOR, а также непланарные графы K_5, образованные отношениями AND (рис. 3). Оценка расхождения кривых, описывающих формирование непланарностей $K_{3,3}$, в условиях, зафиксированных в группе кривых 1 и 2, по критерию Манна – Уитни (оценка для интервала 275-го акта игры): кривые 1 и 2: Z = –8.99; $p = 2.46 \cdot 10^{-19}$; для условий, соответствующих кривым 3 и 4: Z = –13.09; $p = 3.74 \cdot 10^{-39}$.

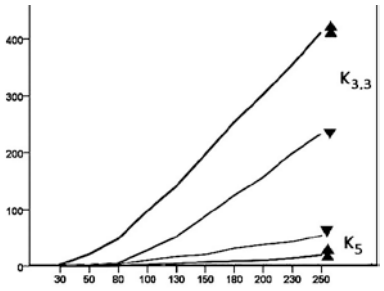


Рис. 3. Характеристики непланарных составляющих сети $K_{3,3}$ (на отношениях XOR) и K_5 (на отношениях AND) при различных соотношениях скорости формирования отношений AND и XOR. По оси абсцисс – номер акта игры. По оси ординат – суммарное количество отношений между компонентами, которые образуют непланарные составляющие сети. Двойной треугольник, обращенный вверх, – условие, что на интервале 75-го акта игры отношений XOR формируется больше, чем отношений AND; кривая для $K_{3,3}$ соответствует группе кривых 1, для K_5 – группе кривых 4. Одинарный треугольник, обращенный вниз, – условие, что на интервале 75-го акта игры отношений AND образуется больше, чем отношений XOR; кривая для $K_{3,3}$ соответствует группе кривых 2, для K_5 – группе кривых 3

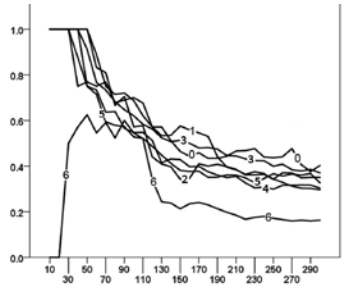


Рис. 4. Динамика изменения доли отношений AND по сравнению с XOR в семи группах участников исследования на протяжении 300 актов игры. По оси абсцисс – номер акта игры. По оси ординат – величина отношения $N_{AND}/(N_{AND}+N_{XOR})$. Цифры на кривых – номера групп участников исследования

Учитывая полученные соотношения формирования отношений XOR и AND, показанных на рис. 1 и 2, а также соответствующие этим закономерностям соотношения темпов формирования непланарных составляющих ПС двух типов: K_5, более характерных для участников исследования групп 0÷4, и $K_{3,3}$, преимущественно включенных в ПС из группы 6, можно предполагать, что общее соотношение количества сформированных отношений XOR и AND, рассчитанное как $N_{AND}/(N_{AND}+N_{XOR})$, будет распределено по группам испытуемых сходным образом. Такое соотношение показано на рис. 4. Общая тенденция динамики соотношения отношений XOR и AND – градуальное снижение по кривой, близкой к логарифмической. На верхней границе семейства располагаются кривые для групп участников исследования из выборки пациентов (0 и 1), кривые для уча-

стников исследования из популяционной выборки (группы 2–5) квазислучайно перемешаны, исключая группу 6 из популяционной выборки. На всем протяжении формирования ПС для этой группы характерна наименьшая доля отношений AND по сравнению с отношениями XOR.

Полученные результаты показывают, что критическим событием, определяющим траекторию процесса формирования отношений XOR и AND является *минимальное* (т. е. хотя бы на *одно* отношение) превышение количества сформированных отношений XOR по сравнению с AND, или отношений AND по сравнению с XOR. Такое минимальное событие, состоявшееся после акта игры 40, определяет не только ту группу кривых, согласно которой будут формироваться отношения между компонентами ПС, но и вероятную принадлежность индивида к одной из 7 выделенных групп участников исследования (точный критерий Фишера для акта игры 44: $\chi^2 = 13.39$, $df = 6$; $p = .032$; для акта 60: $\chi^2 = 16.11$, $df = 6$; $p = .010$).

Обсуждение результатов

Установлено, что траектории формирования отношений XOR и AND для каждого индивида определяются на ранних этапах процесса дифференциации компонентов ПС. Фактором, определяющим принадлежность траектории группе кривых, служит минимальное (хотя бы на одно отношение) превышение количества сформированных отношений одного типа над другим. Эта закономерность асимметрична: 1) если количество сформированных отношений XOR превышает количество отношений AND, то темп формирования отношений XOR достоверно выше, чем в случае превышения количества отношений XOR отношений AND, напротив, если количество сформированных отношений AND выше, чем количество отношений XOR, то темп формирования отношений XOR достоверно снижается; 2) если количество отношений XOR превышает количество отношений AND, то выявляется лишь некоторая тенденция к изменениям в траекториях формирования отношения AND, причем на существенно более поздних этапах формирования ПС. Важно, что самые ранние проявления формирования отношения AND достоверно опережают самые ранние проявления формирования отношений XOR. Приведенные закономерности указывают на то, что формирование отношений XOR вторично по отношению к образованию отношений AND: информационные модели взаимодействия компонентов, описанные как AND, являются протоформой для формирования моделей взаимодействий, описанных как XOR. В терминах алгебры отношений [7] отношение XOR (выделяемое по свойствам *анти*рефлексивности, симметричности и *не*транзитивности) производится из отношения AND (свойства которого: *не*рефлексивность, симметричность и транзитивность) как результат снижения степеней свободы компонентов в их взаимодействиях. В выявленных закономерностях проявляется конкуренция процессов формирования отношений AND и XOR за единый ресурс дифференциации, первоначально используемый в формировании отношений AND, а затем – отношений и AND, и XOR. Можно предположить, что выявленная асимметрия процессов дифференциации отношений XOR и AND, характерная для разных индивидов, может лежать в основе асимметрии интериндивидуальных ПС.

Один из важных результатов работы показывает, что именно конкурентное использование *начального* ресурса дифференциации на ранних этапах формирования ПС определяет нелинейный характер процесса порождения моделей взаимодействия между компонентами ПС, т. е. минимальным изменениям начальных условий соответствуют экспоненциально нарастающие различия в соотношении продуктов дифференциации.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект 18–00–00245 КОМФИ), Институт психологии РАН.

Литература

1. *Александров И.О.* Формирование структуры индивидуального знания. М. : Ин-т психологии РАН, 2006.

2. *Александров И.О., Максимова Н.Е.* Процесс дифференциации: содержание концепта и возможности операционализации в психологических исследованиях // Дифференционно-интеграционная теория развития. Кн. 2. М. : Языки славянской культуры, 2014. С. 87–138.

3. *Максимова Н.Е., Александров И.О.* Компоненты психологического взаимодействия и возможность их операционализации // Человек, субъект, личность в современной психологии : материалы конференции. Т. 3. М. : Ин-т психологии РАН, 2013. С. 161–164.

4. *Максимова, Н.Е., Александров И.О.* Возможная траектория эволюционного развития психологии. Ч. 2. Организация предметной области психологии // Психол. журн. 2016. Т. 37, № 2. С. 5–18.

5. *Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С.* Дифференциация и организация психологических структур при взаимодействии индивида с новыми предметными областями. Ч. I. Свойства аутореплицирующихся структур и их операционализация // Психол. журн. 2019. Т. 40, № 1. С. 15–27.

6. *Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С.* Дифференциация и организация психологических структур при взаимодействии индивида с новыми предметными областями. Часть II. Эмпирические доказательства существования аутореплицирующихся структур // Психол. журн. 2019. Т. 40, № 2. С. 47–65.

7. *Осипов Г.С.* Приобретение знаний интеллектуальными системами. М. : Наука, 1997.

8. *Харари Ф.* Теория графов. М. : Мир, 1973.

Моделирование абсансной эпилепсии сложной осцилляторной нейронной сетью

Т.М. Медведева[1,2], М.В. Сысоева[3], А. Люттйоханн[4], Ж. Луйтелаар[5], И.В. Сысоев[1,6]

[1]Саратовский государственный университет; email: golova93tanya@gmail.com
[2]Институт высшей нервной деятельности РАН, Москва
[3]Саратовский государственный технический университет
[4]Вестфальский университет им. Вильгельма, Мюнстер, Германия
[5]Университет Неймегена им. святого Радбода Утрехского, Неймеген, Нидерланды
[6]Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Пик-волновые разряды известны как основное проявление абсансной эпилепсии – неконвульсивной генерализованной формы [1]. Для понимания механизмов возникновения абсансной эпилепсии важно построить модели, которые воспроизводили бы основные ее особенности. Открытым остается вопрос о том, каково значение структуры нейронной сети для возникновения пик-волновых разрядов. Важная проблема существующих моделей в том, что в них нейроны каждой из рассматриваемых структур формируют интегральный сигнал, который передается потом в другие структуры. Однако в действительности нейроны имеют индивидуальные проекции на нейроны другой структуры, причем далеко не на все, в то же время они могут быть не связаны с рядом находящимися нейронами той же структуры.

Цель данной работы – создание такой модели, которая будет учитывать иерархию организации функциональных единиц нейронных связей, принимающих участие в возникновении и поддержании абсансных разрядов, и воспроизводить некоторые экспериментально наблюдаемые индивидуальные характеристики абсансных сигналов и характеристики связанности.

Построенная модель является мезомасштабной, в ней каждый «нейрон» на самом деле представляет собой группу близких нейронов, которые делятся на возбуждающие и тормозные в зависимости от того, к какой популяции клеток они относятся (PY – пирамиды и TC – таламокортикальные клетки являются возбуждающими, IN – интернейроны и RE – ретикулярные таламические клетки являются тормозными). Интегральный сигнал нейронов, входящих в популяции PY и IN, является аналогом сигнала LFP коры, TC представляет собой совокупность клеток из VPM, а RE – из RTN.

Для моделирования укрупненных нейронов каждого типа были использованы уравнения Фиц-Хью – Нагумо [2]. Уравнения модели решались численно методом Эйлера с шагом 0,5. Связи между структурами были организованы в виде матрицы C, номер строки которой соответствует номеру нейрона, на который происходит воздействие, а номер столбца – номеру воздействующего нейрона соответственно. Матрицы связи генерировались следующим образом. Сначала были найдены матрицы размером $N_{PY} = 40$, $N_{IN} = 10$, $N_{TC} = 40$, $N_{RE} = 40$, которые демонстрировали появление высокоамплитудной генерации в ответ на попытку инициации и последующего поддержания разряда (кратковременное постепенное повышение внутренних связей между нейронами популяции PY, а затем между нейронами PY и RE). Такие матрицы были приняты за патологическую подсеть, ответственную за возникновение пик-волновых разрядов в модели. Далее к каждой из них подбиралась матрица, ответственная за нормальную динамику системы (т. е. не способная отвечать генерацией высокоамплитудных колебаний на попытку их вызвать). Размер таких матриц был PY =160, IN = 40, TC = 80, RE = 80. Временная динамика экспериментальных данных, записанных на крысах линии WAG/Rij, и модельных систем выглядит похожим образом: в фоне наблюдаются шумоподобные низкоамплитудные колебания, во время разряда сигнал становится более периодическим, амплитуда повышается.

В отличие от предложенной нами ранее модели, в текущей отсутствует шум, что обеспечивает воспроизводимость результатов и возможность стабильной генерации разрядов с помощью отобранных матриц. В том числе этим обусловлено наличие подсети, генерирующей нормальную активность, так как раньше эту функцию как раз и выполнял шум. Отдельно смоделированы процессы инициации и поддержания разряда, причем инициация теперь происходит иначе – не с помощью воздействия внешнего входа, а путем усиления внутрикорковых связей. Возможность применения высокочастотной импульсной стимуляции для прерывания разрядов представляет собой основную практическую значимость модели [3, 4].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 19-72-10030).

Литература

1. *Meeren H.K., Pijn J.P., van Luijtelaar E.L., Coenen A.M., Lopes da Silva F.H.* Cortical focus drives widespread corticothalamic networks during spontaneous absence seizures in rats // J. Neurosci. 2002. V. 22. P. 1480–1495.

2. *FitzHugh R.* Mathematical models of threshold phenomena in the nerve membrane // Bull. Math. Biophysics. 1955. V. 17, iss. 4. P. 257–269.

3. *Bal T., Debay D., Destexhe A.* Cortical feedback controls the frequency and synchrony of oscillations in the visual thalamus // J. Neurosci. 2000. V. 20, iss. 19. P. 7478–7488.

4. *Blumenfeld H., McCormick D.A.* Corticothalamic inputs control the pattern of activity generated in thalamocortical networks // J. Neurosci. 2000. V. 20, iss. 13. P. 5153–5162.

Успешность выполнения когнитивных заданий при изменении их сложности в различных условиях

А.А. Меклер[1], Л.О. Ткачёва[2], Е.П. Станкова[3], В.Л. Волохонский[4]

[1]Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет; email: mekler@yandex.ru
[2]Санкт-Петербургский государственный университет; email: tkachewa.luba@gmail.com
[3]Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова, Санкт-Петербург; email: stankova-katya@yandex.ru
[4]JetBrains; email: vladimir@volokhonsky.ru

В представленной работе рассматриваются факторы, влияющие на успешность выполнения задания отслеживания множества объектов (Multiple Objects Tracking task, MOT). В настоящее время известен ряд исследований, направленных на изучение этих факторов. Результаты, полученные в этих исследованиях весьма противоречивы. Не существует единого мнения даже о таком очевидном факторе, как количество отслеживаемых объектов. В частности, в исследовании [1, 2] было показано, что человек может отслеживать 4–5 объектов, движущихся со скоростью от 1,25 до 9,4 °/сек, в течение 7 секунд. В другом исследовании участники могли отслеживать до 8 объектов при скорости движения 3 °/сек в течение 5 секунд [3].

В нашем исследовании было проведено 2 эксперимента, в которых оценивалась успешность выполнения MOT в различных условиях. В обоих экспериментах были одинаковые методы и программная реализация задания. Различались эксперименты факторами, определяющими сложность выполнения задания.

Все стимулы были представлены в черном квадрате (яркость 0,14 кд/м^2) размером 21° × 21°, остальная часть экрана оставалось серой. Стимулы представляли собой светло-серые круги (яркость 50 кд/м^2), диаметр 0,3°. В начале каждой пробы испытуемым предъявлялся крест фиксации белого цвета, яркость 95 кд/м^2, размер 0,4 ° × 0,4°.

После появления креста фиксации по команде экспериментатора с клавиатуры на экране появлялись объекты – целевые и дистракторы. Целевые объекты несколько раз мигали красным, после чего приобретали такой же цвет, как дистракторы, и все объекты начинали движение по полю. Пробы различались по общему количеству объектов, количеству целевых объектов, скорости движения и времени отслеживания. Через некоторое время после начала движения оно прекращалось, и испытуемый отмечал компьютерной мышью те объекты, которые он считал целевыми. Каждый раз в файл записывалась информация о количестве правильно отслеженных целей.

В обоих экспериментах число целей варьировалось от 2 до 7, а общее число объектов – от 10 до 14. Скорости движения составляли 1 и 1,5 °/сек. При этом в первом эксперименте время отслеживания составляло 10 или 15 секунд, а во втором эксперименте – 40 секунд. В первом эксперименте процедура включала в себя 45 проб, а вот втором – 30. Таким образом, в обоих экспериментах испытуемым были предъявлены все сочетания условий отслеживания.

В обоих случаях для каждой пробы оценивался показатель успешности выполнения задания – доля правильно отслеженных целей, из которой вычиталась гипергеометрическая вероятность получения такого результата случайно.

Наибольшее влияние на успешность оказало, как и следовало ожидать, количество целевых стимулов. Также в первом эксперименте на успешность сильное влияние оказывало время отслеживания (во втором оно было значительно больше и не варьировалось).

Анализ результатов показал, что в первом эксперименте существует пороговое число целевых стимулов – при количестве целей до 6 успешность падала незначительно, а при 6 и больше падение было резким. Во втором эксперименте такого порога не наблюдалось. То есть с увеличением количества целей успешность падала, но порогового количества целей не наблюдалось, падение было относительно равномерным.

Исходя из полученных результатов можно предположить, что в процессе отслеживания целей меняется стратегия отслеживания. При этом на начальных этапах отслеживания стратегия практически одинаково эффективна при количестве целей, не превышающем 5, после чего резко падает. Начиная же с некоторого времени отслеживания эффективность отслеживания целей прямо связана с их количеством, монотонно снижаясь с его увеличением.

Поддержано грантом РФФИ № 18-013-01086.

Литература

1. *Pylyshyn Z.W., Storm R.W.* Tracking multiple independent targets: evidence for a parallel tracking mechanism // Spatial Vision. 1988. Vol. 3, № 3. P. 179–197.

2. *Scholl B.J., Pylyshyn Z.W.* Tracking multiple items through occlusion: clues to visual objecthood // Cognitive Psychology. 1999. Vol. 38, № 2. P. 259–290 ; doi: 10.1006/cogp.1998.0698.

3. *Alvarez G.A., Franconeri S.L.* How many objects can you track? : evidence for a resource-limited attentive tracking mechanism // Journal of Vision. 2007. Vol. 7, iss. 13, № 14. P. 1–10 ; doi: 10.1167/7.13.14.

Системно-когнитивные технологии в медико-биологических исследованиях

Е.Н. Минина[1], А.Г. Ластовецкий[2]

[1]Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Таврическая академия, Симферополь; email:cere-el@yandex.ru
[2]Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения, Москва

Сложные системы, к которым относится и их функциональные подсистемы, не программируются, а обучаются. Обучение в данном контексте обозначает, что система учится правильно предугадывать входные данные. Она сравнивает непрерывно меняющиеся входные сигналы и информацию, имеющуюся в памяти, и прогнозирует следующие сигналы. Запоминание и распознавание паттернов является основой для выработки этих предсказаний. После того, как иерархическая память системы выучила, какие паттерны, скорее всего, следуют за какими, она может предсказать появление следующих паттернов на основе прошлых и текущих входов. При этом динамические параметры внутреннего состояния в виде структурно-функциональной схемы системной организации в обеспечении гомеостаза и поддержания адаптационных параметров в пределах физиологической нормы формируют определенный «образ-символ».

Очевидно, что для обеспечения оптимального управления активными объектами и их диагностики, как на детерминистских, так и на бифуркационных этапах их развития, существует определенный системно-когнитивный образ реализации процессов, выявление и формализация которого в медико-биологической сфере является не изученным и мало отраженным в литературных данных объектом исследования [1–3, 8–10].

Понятие «образ» относится к парадигме распределенной памяти и связано с процессором Хопфилда. Понятие «символ» относится к парадигме концептуальной памяти и связывается с именами Гроссберга и Кохонена. Такой подход укладывается в парадигму когнитивной эпистомологии, которая постулирует, что когнитивность является атрибутом всего живого, а когнитивная функциональность наиболее эффективна.

Со времен Н. Винера известно: чтобы регулирующий блок сложной системы мог корректно осуществлять свои функции, ему необходимо обладать «образом», моделью, «указующим перстом» регулируемой системы для оперирования множественными обратными связями [4–6]. Это позволяет оценивать ключевые параметры состояния системы в любой период времени, сравнивать их с желаемым, производить необходимую коррекцию. Так, например, концепция иммункулуса как образа, отражающего молекулярно-функциональное состояние организма в каждый данный момент времени, служит логическим продолжением и развитием гипотезы об «иммунологическом гомункулусе», предложенной И. Коэном. Соответственно, «иммункулус» должен рассматриваться не столько в качестве пассивного «зеркала», отражающего состояние организма, сколько в качестве своеобразного «гироскопического» устройства, активно участвующего в поддержании гомеостаза [5–7]. Системная эволюция приводит к формированию второго контура обратных связей, и, согласно семантической теории информации А.А. Харкевича, можно высказать суждение о существовании системно-когнитивного образа реализации процессов в функциональных системах биологических объектов как семантической меры целесообразности информации и критерия качества их функционирования.

В связи с этим «считывание», распознавание «системных функциональных образов» с использованием инновационных технических решений позволит осуществлять задачи раннего выявления изменения вектора состояния системы. Эридитарность, как качество системной памяти любой природы, позволяет прогнозировать дальнейшее течение процессов на основе предыдущей системной истории при формировании функционального следа.

По результатам исследований была сформулирована классификация технологий диагностики, характеризующихся качеством когнитивности:

1. Регистрация и интерпретация скорости биоциклического сигнала в фазовом пространстве состояний как качества процесса с использованием когнитивной графики и интеллектуальных систем распознавания образов [1–3, 9, 10, 13–21].

2. Формирование когнитивной матрицы принятия решений по совокупности признаков.

3. Построение графической динамической системы процесса с использованием регуляторных паттернов, изучение вектора процесса [25].

4. Построение сети системных взаимосвязей с использованием графов [14, 24].

5. Анализ временного ряда процесса (периодограммы) и других параметрических данных с использованием энтропийно-динамического подхода, фазовой плоскости и фазовой кривой [22, 23, 26].

6. Оценка массива первичных данных с использованием нелинейных методов обработки информации, например алгебраической модели конструктивной логики или нейронных сетей [11, 12].

Таким образом, основу методологии когнитивного моделирования составляет системный

подход к изучению сложных систем и опора на «когнитивные способности и разрешающие возможности» конкретной методики исследования с заложенной функцией распознавания [1, 3], существующей как в реальных системах при принятии решений, так и в процессе их моделирования при реализации в диагностических технологиях.

Литература

1. *Логов А.Б., Замараев Р.Ю.* Кардиодиагностика в информационно-фазовом пространстве // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2015. Т. 14, № 1. С. 117–121.

2. *Gorelova G.V. [et al.]* Experience in cognitive modeling of complex systems // Cubernetics and systems 2010 : Proc. 20th European Meeting on Cybernetics and Systems Research. Vienna, 2010. P. 220–223.

3. *Анохин К.В.* Когнитом: сетевое расширение теории функциональных систем // Современные проблемы системной регуляции физиологических функций : материалы конференции. 2015. С. 3–5.

4. *Винер Н.* Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. М. : Советское радио, 1958. 216 с.

5. *Zaichik A.Sh., Churilov L.P., Utekhin V.J.* Autoimmune regulation of genetically determined cell functions in health and disease // Pathophysiology. 2008. Vol. 15 (3). P. 191–207.

6. *Cohen I.R., Young D.B.* Autoimmunity, microbial immunity and the immunological homunculus // Immunol. Today 1991. Vol. 12. P. 105–110.

7. *Полетаев А.Б.* Физиологическая иммунология: естественные аутоантитела и проблемы наномедицины. М. : Миклош, 2010. 218 с.

8. *Меерсон Ф.З., Пшенникова М.Г.* Адаптация к стрессорным ситуациям и физическим нагрузкам. М. : Медицина, 1988. 256 с.

9. *Луценко Е.В.* Автоматизированный системно-когнитивный анализ в управлении активными системами. Краснодар : КГАУ, 2002. 605 с.

10. *Горелова Г.В., Верба В.А., Захарова Е.Н.* Процесс принятия решений и его поддержка на основе когнитивного моделирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2005. № 10 (54). С. 13–20.

11. *Еськов В.М., Живогляд Р.Н., Карташова Н.М., Попов Ю.М., Хадарцев А.А.* Понятие нормы и патологии в фазовом пространстве состояний с позиций компартентно-кластерного подхода // Вестник новых медицинских технологий. 2005. Т. 12, № 1. С. 12–14.

12. *Хромушин В.А., Бучель В.Ф., Жеребцова В.А., Честнова Т.В.* Программа построения алгебраических моделей конструктивной логики в биофизике, биологии и медицине // Вестник новых медицинских технологий. Тула : НИИ новых медицинских технологий, 2008. № 4. С. 173–174.

13. *Mezentseva, S.S.* Mathematical analysis of the stability of heart-rate dynamics in postinfarction patients / S.S. Mezentseva and all // Biophysics. 2017. Vol. 62, № 3. P. 499–502.

14. *Минина Е.Н., Ластовецкий А.Г.* Особенности прогнозирования эффективности функционирования кардиогемодинамики с учетом линейных и хаотических режимов // Вестник новых медицинских технологий [Электронное издание]. 2018. № 1/2. Публ. 1-1.

15. *Минина Е.Н., Файнзильберг Л.С.* Фазовый портрет одноканальной ЭКГ в оценке функциональных резервов сердечно-сосудистой системы // Вестник новых медицинских технологий. 2014. Т. 21, № 3. С. 22–27.

16. *Минина Е.Н.* Новый подход в изучении взаимосвязи функциональной подготовленности и электрогенеза у спортсменов с использованием эталонного кардиоцикла // Вестник новых медицинских технологий [Электронное издание]. 2014. № 1. Публ. 1-8. URL: http://medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2014-1/4931. pdf. (Дата об-ращения: 03.07.2014).

17. *Минина Е.Н.* Возможности оценки процессов реполяризации миокарда с использованием эталонного кардиоцикла // Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2015. Т. 1 (67), № 4. С. 26–35.

18. *Минина Е.Н.* Анализ волны Т ЭКГ в фазовом пространстве в определении функциональных резервов миокарда // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. 2013. Т. 26 (65), № 2. С. 148 –153.

19. *Файнзильберг Л.С., Минина Е.Н.* Исследование диагностической ценности угла ориентации фазового портрета одноканальной ЭКГ как индикатора функционального состояния миокарда // Клиническая информатика и телемедицина. 2013. Т. 9, № 10. С. 33–42.

20. *Файнзильберг Л.С., Минина Е.Н.* Оценка функционального состояния сердечно-сосудистой системы по величине разброса фазовых траекторий одноканальной ЭКГ // Кибернетика и вычислительная техника. 2014. № 1. С. 5–19.

21. *Минина Е.Н., Файнзильберг Л.С.* Анализ функционального состояния сердечно-сосудистой системы по совокупности признаков фазового портрета одноканальной ЭКГ // Российский кардиологический журнал. 2015. Т. 12 (128). С. 7–13.

22. *Frank B., Pompe B., Schneider U., Hoyer D.* Permutation entropy improves fetal behavioural state classification based on heart rate analysis from biomagnetic recordings in near term fetuses// Medical & Biological Engineering & Computing. 2006. № 44. P. 179–187.

23. *Дурнова Н.Ю., Довгалевский Я.П., Бурлака А.Н., Киселев А.Р., Фурман Н.В.* Изучение зависимостей между показателями вариационной пульсометрии, энтропии ритма сердца, временного и спектрального анализов вариабельности ритма сердца в норме и при ишемической болезни сердца // Саратовский научно-медицинский журнал. 2011. Т. 7, № 3. С. 608–611.

24. *Горбань И.И.* Энтропия неопределенности // Математические машины и системы. 2013. № 2. С. 105–117.

25. *Минина Е.Н., Файнзильберг Л.С.* Анализ кардиогемодинамического функционирования с использованием энтропийного подхода и метода фазовой плоскости // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 4. С. 5–17.

26. *Файнзильберг Л.С., Ориховская К.Б., Ваховский И.В.* Оценка хаотичности формы фрагментов одноканальной электрокардиограммы // Кибернетика и вычислительная техника. 2016. Вып. 183. С. 4–24.

О формализации описания амнестического синдрома

Ю.В. Никонов

ФГУБЗ МСЧ № 59 ФМБА России, г. Заречный, Пензенская область; email: nikyuv@yandex.ru

В последние годы были опубликованы результаты экспериментов ряда исследователей на людях и животных, которые подтвердили, что сформировавшиеся ранее в рамках эпизодической памяти следы памяти на короткое время после повторной активации приобретают способность интегрировать в себя новые элементы, а также могут быть уничтожены (процесс реконсолидации памяти). Каждое извлечение информации из памяти на уровне нейронных сетей – процесс активной реконструкции сети нейронов, никогда точно не повторяющий первоначальное запечатление события. Остается дискуссионным вопрос о том, приводит ли акт реконсолидации к формированию нового «интегрированного» содержания памяти, которое занимает место старого, или новое содержание сосуществует со старым. По мнению В.В. Нурковой, популярность концепции реконсолидации связана с попытками согласований психологического и нейрофизиологического уровней рассмотрения. Были получены многочисленные данные о трансформациях эпизодических воспоминаний под воздействием ретроспективной переинтерпретации событий прошлого, воображения альтернативного протекания событий и процесса конструктивного дополнения пробелов в воспоминаниях [6, 7]. Более того, для одного и того же физического или психического акта запечатления образуются множественные, не полностью идентичные копии – в одной из работ К. Анохина процесс реконсолидации описан как формирование «фенокопий» следа памяти со свойством «вырожденности» (свойство вырожденности обычно для объектов квантовых, а не классических) [1].

При описании когнитивных процессов человека в квантовой когнитивистике (междисциплинарное научное направление, использующее математический формализм квантовой механики для описания и моделирования когнитивных и социальных процессов и явлений в рамках психологии, биологии, социологии, которое позволяет получать модели когнитивных и социальных процессов, обладающие не только описательной, но и предсказательной силой) все чаще используется представление об их квантовоподобности (англ. quantum-like) [4, 5]. В этом случае, хотя процессы описываются с помощью математического аппарата квантовой механики, они не являются квантовыми в физическом смысле. Об актуальности такого подхода в науках о человеке свидетельствует, в частности проведение 17–18 мая 2018 года в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики международной конференции «Cognitive Technologies and Quantum Intelligence», на которой, в частности, рассматривалось моделирование иррациональных стратегий поведения человека с привлечением формализма квантовой механики.

А.А. Ежовым [4] недавно отмечено, что такие интерпретации квантовой теории, как транзакционная квантовая механика, вводят в рассмотрение процессы распространения взаимодействий в обоих направлениях времени и «подобные процессы могут привлекаться для объяснения явлений предвосхищения», описанных, в частности, психиатром Т.А. Доброхотовой и неврологом Н.Н. Брагиной [3].

В 2015 году появилась статья Джордана Котлера и нобелевского лауреата Френка Вильчека «Запутанные истории». В ней утверждается, что проведенные на основе концепции согласованных историй Роберта Гриффитса мысленные эксперименты и расчеты, которые поддаются экспериментальной проверке, позволяют анализировать квантовые варианты историй, в которых имеются своеобразные неклассические корреляции во времени [9]. В 2018 году М. Новаковский, Э. Коэн и П. Городецкий в рамках концепции существования и взаимодействия в квантовой механике двух направлений времени показали, что формализм вектора двух состояний и формализм запутанных историй с помощью надлежащим образом определенных скалярных произведений могут быть изоморфными [11]; этот подход в настоящее время оценивается как концептуально полезный и плодотворный для изучения ряда проблем квантовой механики. Векторный формализм двух состояний (вариант процессов распространения взаимодействий в обоих направлениях времени) является временным симметричным описанием стандартной квантовой механики, предложенным Ахароновым, Бергманном и Лебовицем еще в 1964 году [12]. Он описывает квантовую систему в конкретном времени двумя квантовыми состояниями: обычным, развивающимся вперед во времени, определяемым результатами полного измерения в более раннее время, и квантовым состоянием, эволюционирующим назад во времени, определяемым результатами полного измерения в более позднее время. Различие между этими квантовыми состояниями следует из асимметрии памяти относительно стрелы времени: мы не «помним» будущего и, следовательно, не можем зафиксировать конечное состояние измерительного устройства. Векторный формализм двух состояний эквивалентен стандартной квантовой механике, совместим почти со всеми интерпретациями квантовой механики [9, 12].

Еще в семидесятых годах прошлого века Т.А. Доброхотова и Н.Н. Брагина, пытаясь ответить на вопрос, в каких соотношениях между со-

бой находятся пространство и время внешнего мира, пространство и время, в которых функционирует целостный мозг, предположили, что мозг человека «создает» «индивидуальное» пространство и время, в которых и осуществляются психические процессы. Согласно этой концепции, предполагается возможность не одного, а двух направлений времени психического функционирования, что означает «одновременную», параллельную реализацию психосенсорных (фиксирующихся в эпизодической памяти) и психомоторных процессов, которые осуществляются или начинают осуществляться в настоящем времени, а хранятся и завершаются соответственно в прошлом и будущем временах. Настоящее время, как интервал между двумя восприятиями, имеет переменную длительность. «Одновременно» существует два противоположно направленных настоящих времени: настоящее с переходом в будущее время и настоящее с переходом в прошлое [2].

Предположим, что два настоящих времени «индивидуального» пространства и времени человека, по Т.А. Доброхотовой и Н.Н. Брагиной, соответствуют гипотезе формализма двух векторов – двух состояний квантовой механики. Но, так как психические процессы происходят в другом временном масштабе по сравнению с процессами квантовой механики, то можно говорить лишь об их подобии квантовоподобным закономерностям «индивидуальных» времен человека. Согласно этой концепции, прошедшее время в сознании здорового человека «скрыто, подавлено»; предполагается обязательная потенциальная готовность его к актуализации. Причем чем более подавлено настоящее «индивидуальное» время, тем более актуализировано содержание прошлого времени. Подтверждается клиническими наблюдениями, что у больного, по Доброхотовой и Брагиной, с «правополушарным» поражением мозга уменьшению актуальности («ослаблению», «исчезновению») «индивидуального» настоящего времени неизбежно сопутствует оживление содержания прошедшего времени. В сознании больного оживляются чувственные образы бывших восприятий, т. е. содержание эпизодической памяти. Причем из клинических наблюдений видно, что чувственные образы прошлых восприятий «записаны» в именно той последовательности, в какой и совершались отраженные в этих образах события. Даже в патологических состояниях, оживляясь непроизвольно, они «проигрываются» всегда от начала к концу (например, «вспышки пережитого»). Важно, что асимметрия этих двух времен, как и асимметрия прошлого и будущего уменьшается (прерывается) при ряде поражений головного мозга [2, 3], что может соответствовать нивелировке векторов формализма двух состояний при «надлежащим образом определенных» скалярных произведениях квантового формализма векторов двух состояний [12].

Квалификация одного из часто встречающихся расстройств психики – корсаковского синдрома (КС) – продолжает вызывать споры специалистов. КС (он же амнестический синдром) относится в руководствах по психиатрии к патологии памяти, возникает от множества причин (интоксикации, в том числе алкогольной, черепно-мозговых травм, инфекций и т. д.). КС в типичных случаях включает в себя: фиксационную амнезию, проявляющуюся как незапоминание текущих событий, ретроградную амнезию (выпадение воспоминаний о событиях, предшествовавших началу заболевания и воспринимавшихся больным, когда он был в ясном сознании), антероградную амнезию (утрата воспоминаний о событиях, происходивших в период, следующий за острым этапом болезни). Обычны при КС дезориентировка во времени, пространстве, окружающей и личной ситуации, ложные воспоминания (спровоцированные расспросами или спонтанные), заполняющие пробелы памяти. Такие больные не могут запомнить только что услышанное и увиденное, новых для них людей, не находят свою палату, постель, не знают, ели сегодня или нет. Характерны ошибочные ответы на вопросы о своем возрасте, текущей дате, времени пребывания в больнице. Больной сообщает о событиях, в действительности не имевших места, но которые вполне могли бы произойти. Например, о поездке, которой не было, о разговоре, не происходившем на самом деле, причем обычно речь идет о недавнем времени. Эти высказывания могут многократно меняться в течение одного дня. Значительно реже возникают спонтанно возникающие, относительно стойкие, не совместимые с действительностью воспоминания, иногда фантастические, типа совершения межпланетных перелетов. Предоставленные сами себе пациенты с КС пассивны, вялы, ничем не заняты, не способны к целенаправленному поведению, не осознают наличие болезни. Психика больного с КС находится в особом, латентном состоянии, воспоминания о событиях ближнего прошлого крайне изменчивы, неопределенны. Только внешнее воздействие в виде вопросов «проявляет» латентные, преходящие реальности, отличающиеся друг от друга содержанием последнего по счету интервала «индивидуального» времени. Налицо неоднозначность эпизодической памяти о событиях недавнего прошлого, иногда радикально различные версии личностной истории. Обычно фиксационную амнезию описывают как отдельный феномен, она выглядит как амнезия текущих событий; а появляющиеся «пробелы» памяти заполняют конфабуляции [2, 3, 5]. Однако возможен и иной взгляд на фиксационную амнезию: нивелировка асимметрии двух противоположно направленных времен, составляющих «индивидуальное» время человека, ведет к тому, что условно одному периоду прошлого времени соответствует несколько несовместимых событий – версий прошлого (иногда в ряду других возможен отчет больного и о реальном событии) [8].

Впрочем, отечественный психиатр М.Я. Серейский еще в 1940 году писал о КС: «...то, что при разговоре с этого рода больными выявляется как расстройство способности к запоминанию, представляет нечто другое, чем амнезия в отношении событий. ...Прежде всего и больше всего

нарушено чувство времени, осознание фактора времени, временной знак пережитого, хронология» [8].

В статье сделана попытка формализации описания амнестического синдрома с помощью квантовоподобного формализма (не являющегося квантовым в физическом смысле) и нетривиальных свойств нейронных версий-следов эпизодической памяти во время процесса ее реконсолидации. Предполагается, что формализм вектора двух состояний (формализм квантовой механики, учитывающий распространение взаимодействий в обоих направлениях времени: будущее – прошлое), который дуален формализму запутанных историй, соответствует гипотезе существования двух противоположно направленных настоящих времен «индивидуального» времени человека по Т.А. Доброхотовой и Н.Н. Брагиной. Изложенная концептуальная модель фиксационной амнезии, рассматриваемая в рамках квантовоподобности реконсолидации эпизодической памяти может быть полезной для разработок в области оперативной памяти нейроморфных систем, основанных на искусственных нейронных сетях с мемристивными устройствами [10].

Литература

1. *Анохин К.В.* На пути к нейроморфному интеллекту: эксперименты, модели и технологии [Электронный ресурс] // БиоН. Нейротехнологии. Н. Новгород, 2011. URL: http://www.school2.neurobiotech.ru/sites/default/files/AnokhinNN.pdf.

2. *Брагина Н.Н., Доброхотова Т.А.* Функциональные асимметрии человека. М. : Медицина, 1988. 240 с.

3. *Доброхотова Т.А., Брагина Н.Н.* Функциональная асимметрия и психопатология очаговых поражений мозга. М., 1977. 357 с.

4. *Ежов А.А.* Простая классическая и квантовая модели, воспроизводящие асимметрии головного мозга // Асимметрия. 2019. Т. 13, № 1. С. 13–39.

5. *Никонов Ю.В.* Об амнезии Корсакова (возможная интерпретация) // Время и рациональность : (философский, теоретический и практический аспекты). Новочеркасск : НОК, 2009. С. 286–296.

6. *Нуркова В.В.* Роль автобиографической памяти в структуре идентичности личности // Мир психологии. 2004. № 2. С. 77–87.

7. *Нуркова В.В., Гофман А.А.* Забывание: проблема наличия следа памяти, его доступности и намеренного контроля // Национальный психологический журнал. 2016. № 3 (23). С. 64–71.

8. *Серейский М.Я.* Корсаковский психоз в свете современной клиники // 50 лет психиатрической клиники им. С.С. Корсакова. М. : Изд-во Академии мед. наук СССР, 1940. С. 43–51.

9. *Cotler J., Jian Chao-Ming, Qi Xiao-Liang, Wilczek F.* Superdensity operators for spacetime quantum mechanics. 2017. ArXiv:1711.03119.

10. Memristive device as an active synapse. 16.10.2018. URL: http://eng.unn.ru/news2/memristive-device-as-an-active-synapse.

11. *Nowakowski M., Cohen E., Horodecki P.* Entangled histories vs. the two-state-vector formalism – towards a better understanding of quantum temporal correlations // Phys. Rev. A. 2018. V. 98. P. 032313.

12. *Vaidman L.* The two-state vector formalism. 2007. ArXiv:0706.1347v1.

Поиск взаимосвязей между особенностями поведения взрослых испытуемых и компонентами ССП в парадигмах go/nogo и novel

Н.С. Нужина, П.А. Продиус, И.В. Мухина

Приволжский исследовательский медицинский университет Минздрава РФ, Нижний Новгород

Введение

Поведение взрослого человека опирается на наиболее важные структуры головного мозга – лобную кору, речевые центры и другие структуры, обеспечивая индивидуальное своеобразие когнитивной деятельности и контроля своего поведения. Целенаправленная деятельность человека в онтогенезе связана с созреванием структур головного мозга, увеличением роли лобных структур, а также речевых центров. Среди причин, обеспечивающих индивидуальное разнообразие поведения, можно выделить гетерохронное созревание мозга у детей [1]. Для детей школьного возраста такая гетерохронность может проявляться в нарушении функций внимания, повышенной импульсивности и гиперактивности [2]. Для изучения нейрофизиологических механизмов синдрома дефицита внимания и гиперактивности применяют тест go/nogo. Вызванная активность мозга у детей с СДВГ отличается от нормы снижением амплитуды позитивной волны P300 для пробы nogo. При выполнении теста go/nogo возрастает активность префронтальной области, которая осуществляет функции произвольного внимания для реакции на целевой стимул и подавления ответов на нецелевые стимулы [3]. Поэтому СДВГ связывают с дефицитом тормозного контроля и произвольного внимания.

При исследовании нейрофизиологических механизмов СДВГ у взрослых наблюдаются свои особенности. Нарушение контроля поведения может проявляться импульсивностью и быстротой ответных реакций. Такое поведение может также коррелировать с замедлением и редукцией компонента P300 [4]. У взрослых нарушения контроля поведения, в зависимости от трудности и характера задания, могут коррелировать с изменением амплитуды волны N200. Кроме nogo, используются редкие отвлекающие нерелевантные стимулы novell. Основным нейрофизиологическим маркером считается позитивный компонент P3a [5].

Интересно, что при исследовании СДВГ выявили взаимосвязь не только с показателями контроля поведения и внимания, но и с когнитивным стилем, оперативной памятью, беглостью речи и т. д. [6–8]. То есть, если рассматривать СДВГ как атипичное созревание мозга, то мы имеем сложную картину неоднородного развития различных психических функций, в разной степени отклоняющихся от более типичного профиля.

Вместо «черно-белой» модели целенаправленной деятельности (СДВГ и норма) у взрослых в качестве основного объекта исследования мы выбрали своеобразие поведения и его нейрофизиологические механизмы.

Цель нашего исследования: используя нейрофизиологические методы, успешно применяемые для изучения СДВГ, а также психометрические методы оценки когнитивных функций, изучить возможность построения нейрофизиологических профилей обработки информации, раскрывающих своеобразие когнитивной и целенаправленной деятельности в лобных и теменных отделах головного мозга.

Методы

Участники исследования – 25 испытуемых в возрасте от 18 до 25 лет с нормальным или корректированным зрением. Методика предъявления стимульного материала в парадигме go/nogo была подробно описана ранее [9].

Регистрация ЭЭГ осуществлялась на энцефалографе «Нейрон-СпектрВПМ «Нейрософт» с помощью программы «Нейрон-Спектр.Net» с частотой дискретизации 1000 Гц в 9 отведениях (Fz, Pz).

Проводилось тестирование испытуемых с помощью психометрических методик. Для того чтобы охарактеризовать функции внимания, использовалась таблица Горбова – Шульте. Она представляет собой таблицу с черными и красными числами. С учетом времени исследуемому лицу нужно найти и показать в таблице сначала числа черного цвета по возрастанию, затем числа красного цвета по убыванию, затем называть и указывать числа, чередуя черные – по возрастанию, а красные – по убыванию. Далее, по времени, затраченному испытуемым на выполнение каждого из трех заданий, с помощью известных формул рассчитывались следующие показатели: объем внимания, распределение внимания, переключение внимания. Также использовался тест Струпа, позволяющий дать заключение о вербальности и интерференции. Тест состоит из трех таблиц (1 – слова, 2 – цветные знаки, 3 – цветные слова), с учетом времени исследуемому лицу предлагается в первой таблице последовательно читать словесные названия цветов, во второй – называть цвета, которыми окрашены символы «х», в третьей – последовательно называть цвета, которыми окрашены словесные названия цветов. Далее, по времени, затраченному испытуемым на выполнение каждого из трех заданий, с помощью известных формул рассчитывались интерференция и вербальность. Беглость чтения проверялась с помощью прочтения испытуемым текста «Цель и само-

оценка» Д.С. Лихачёва, при этом засекалось время и учитывалось количество слов, прочитанных испытуемым за 1 минуту.

Анализ поведения – сравнивали средние значения времени реакции в пробе go. Анализ ССП – сравнивали средние значения амплитуд и пиковых латентностей связанных с событием потенциалов на усредненных отрезках ЭЭГ в 600 мс после предъявления go-, nogo- и novel-стимулов. Анализ особенностей высших психических функций и когнитивных стилей – сравнивали средние показатели объема внимания, распределения внимания, переключения внимания, вербальность, интерференцию, беглость чтения. Проводили феноменологический визуальный анализ различий кривых ССП в полярных по показателям поведения группах. Проводили корреляционный анализ поведенческих, психометрических и нейрофизиологических показателей по Пирсону.

Результаты

Поведение. Среднее время реакции в пробе go было выше (377 мс), чем в случае ошибочного нажатия в пробе nogo (315 мс) и novel (269 мс). Учитывая распределение ошибок, go можно отнести к легкому заданию (среднее число ошибок 13,48, что составляет 2,8 %), novel – к средней сложности (среднее число ошибок 8,64, что составляет 10,8 %), nogo – к трудному (среднее число ошибок 28,36, что составляет 35,45 %).

Исследование связи ССП в пробе go и особенностей поведения и функции внимания. Проба go представляет собой наиболее простое и частое задание, когда исследуемому лицу необходимо реагировать на заданный однородный стимул, появляющийся значительно чаще нерелевантных стимулов. Это приводит к более автоматизированной обработке информации мозгом, однако в то же время требует высокой интенсивности процессов, связанных со вниманием. Для пробы go была выявлена наибольшая корреляционная связь как в лобных, так и в затылочных отведениях. Наиболее выраженной и статистически достоверной оказалась корреляционная связь между распределением внимания и пиковой латентностью негативной волны N200 в теменном центральном отведении (рис. 1).

Это означает, что более высоким показателям функции внимания (соответственно меньшим числовым значениям показателя распределения внимания) соответствует более ранняя пиковая латентность N200. Лучшие показатели по объему внимания (т. е. меньшие числовые значения) также соответствуют более раннему появлению пиковой латентности компонента N200 в центральном лобном отведении и центральном теменном отведении. Кроме того, была выявлена тенденция к снижению амплитуды компонента P300 в центральном теменном отведении при ухудшении показателей объема внимания.

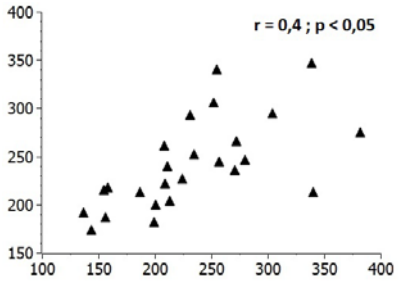


Рис. 1. Скатерограмма корреляционного анализа. По оси *X* – среднее время выполнения теста на распределение внимания (сек), по оси *Y* – средняя пиковая латентность N200 в отведении Pz в пробе go (мс)

При анализе времени реакции было обнаружено увеличение амплитуды волны P300 в группе более быстро реагирующих на появление релевантного стимула участников (рис. 2).

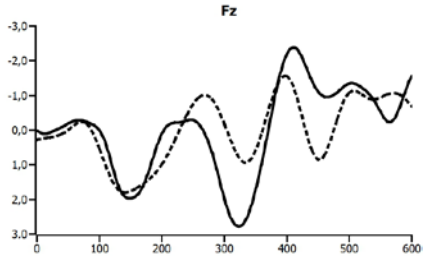


Рис. 2. Кривые ССП на предъявление релевантного стимула go в группе более быстрых (сплошная линия) и менее быстрых (пунктирная линия) в центральном лобном отведении

Исследование связи ССП в пробе nogo и показателей психометрических тестов. Проба nogo представляет собой наиболее трудное задание, требующее высокого контроля поведения. Исследуемому лицу приходится воздерживаться от реакции на стимул, схожий с релевантным и появляющийся гораздо реже релевантных стимулов. Были выявлены тенденции к связи показателей вербальности и интерференции с амплитудой и пиковой латентностью ССП в пробе nogo. Интерференция представляет собой непреднамеренное отвлечение на решение побочной задачи в процессе выполнения другой, главной, задачи. В тесте Струпа интерференция является результатом конфликта вербальных и сенсорно-перцептивных функций: испытуемый должен игнорировать значение слова и назвать цвет, который он видит. Низкая интерференция говорит о способности тормозить более сильные по своей природе вербальные функции ради восприятия цвета, высокая – о том, что испытуемый с трудом освобождается от влияния значения слова при его несоответствии наглядному впечатлению.

При рассмотрении ССП в полярных по данному показателю группах наблюдали увеличение амплитуды компонента N200 в центральном теменном отведении у более ригидных испытуемых, т. е. лиц с более высокой интерференцией (рис. 3). Также была выявлена тенденция к увеличению пиковой латентности компонента N200 с увеличением показателя вербальности в центральном теменном отведении и к увеличению амплитуды N200 со снижением показателя вербальности в центральном лобном отведении.

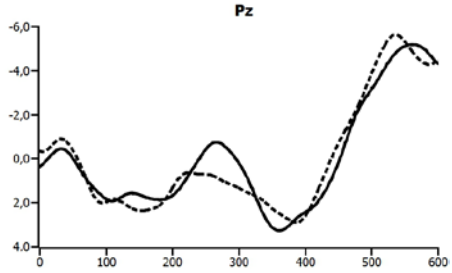


Рис. 3. Кривые ССП на предъявление нерелевантного стимула nogo в группе более ригидных (сплошная линия) и более гибких (пунктирная линия)

Исследование связи ССП в пробе novell и показателей психометрических тестов. Проба novell предполагает появление отвлекающего стимула, не похожего на остальные пробы, при этом стимул является нерелевантным и появляется реже релевантных. При сопоставлении характеристик внимания, беглости речи, когнитивного стиля с амплитудой и пиковой латентностью ССП в пробе novell обнаружили следующие тенденции. Наблюдается снижение амплитуды компонента N200 у исследуемых лиц с более высокой вербальностью в центральных теменных отведениях (рис. 4). Также была выявлена тенденция к уменьшению амплитуды компонента N200 в центральных теменных отведениях при увеличении значений показателя объема внимания. Кроме того, была установлена тенденция к укорочению пиковой латентности компонента N200 при увеличении показателей беглости чтения.

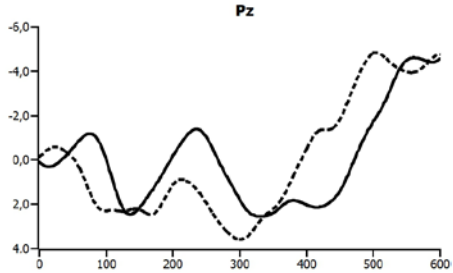


Рис. 4. Кривые ССП на предъявление нерелевантного стимула novell в группе с более низкой (сплошная линия) и более высокой вербальностью (пунктирная линия)

Обсуждение

Для задания go обнаружили наибольшее количество тенденций и связей между нейрофизиологическими характеристиками обработки частых однородных сигналов и поведенческими особенностями. Среди характеристик ССП определяющими своеобразие обработки сигналов go можно выделить амплитуду и пиковую латентность волны N200. Среди психометрических характеристик, от которых в большей степени зависит индивидуальное разнообразие поведения, – характеристики внимания. Это может указывать на важность темпов и качества созревания фронтоталомической системы в онтогенезе. Особенности формирования фронтоталомической системы могут существенно повлиять на индивидуальные особенности поведения.

Для задания nogo с более редким, нерелевантным и трудно дифференцируемым от go стимулом обнаружены тенденции связей характеристик N200 и гибкости/ригидности когнитивного стиля. Для другого нерелевантного сигнала novell также обнаружена слабая корреляционная связь с одной из характеристик данного когнитивного стиля (вербальность). Таким образом, у взрослого человека негативная волна N200 отражает особенности обработки информации в ситуации конфликта похожих значимых и незначимых стимулов, а также редких и неожиданных стимулов.

Если условно выделить из каждой поведенческой характеристики, взятой нами для сравнения ССП (рис. 2, рис. 3, рис. 4), более благоприятный диапазон для эффективной обработки информации, то можно увидеть общие черты «эффективного» и «неэффективного» нейрофизиологического профиля. У испытуемых с более медленной реакцией go (менее импульсивные), гибким когнитивным стилем и высоким уровнем вербальности в диапазоне от 150 до 350 мс мы наблюдаем более низкоамплитудные компоненты ССП. Эту особенность можно гипотетически рассматривать как эффективный нейрофизиологический профиль обработки информации.

Исследования по созданию подобных нейрофизиологических профилей как набора нейрофизиологических маркеров умственной и целенаправленной деятельности могут найти свое применение в разработке новых образовательных технологий и интерфейсов «мозг – компьютер».

Литература

1. *Кропотов Ю.Д.* Роль стриатума в селекции действий // Физиологический журнал. 1997. Т. 83, № 1. С. 45–48.

2. *Фарбер Д.А., Дубровинская Н.В.* Функциональная организация развивающегося мозга (возрастные особенности и некоторые закономерности) // Физиол. чел. 1991. Т. 17, № 5. С. 17–27.

3. *Miller E.K., Cohen J.D.* An integrative theory of prefrontal cortex function // Annu Rev Neurosci. 2001. P. 167–202.

4. *Chen A.C., Poricsz B.* Reduced frontal lobe activity in subjects with high impulsivity and alcoholism // Alcohol Clin. Exp. Res. 2007. V. 31 (1). P. 156–165.

5. *Polich J., Criado J.R.* Neuropsychology and neurophar-macology of P3a and P3b // Int. J. Psychophysiol. 2006. V. 60. P. 172–185.

6. *Луцюк Н.В., Эйсмонт Е.В., Павленко В.Б.* Связь характеристик вызванных ЭЭГ-потенциалов, зарегистрированных в условиях парадигмы GO/NO-GO, с показателями внимания у детей // Нейрофизиология/ Neurophysiology. 2005. Т. 37, № 5/6. С. 452–458.

7. *Redick T.S., Calvo A., Gay C.E.* Engle working memory capacity and Go/No-Go task performance: selective effects of updating, maintenance, and inhibition/ // J. Experimental Psychology Learning, Memory, and Cognition. 2011. V. 37, № 2. P. 308–324.

8. *Van Mourik R., Oosterlaan J., Sergeant J.* The Stroop revisited: a meta-analysis of interference control in ADHD // J. Child Psychology Psychiatry. 2005. V. 46 (2). P. 150–165.

9. *Продиус П.А.* Нейрофизиологические маркеры контроля поведения в парадигмах go/nogo и novel // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2017. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2017. С. 176–177.

Расчеты динамических процессов на модели кортикальной колонки с учетом нейрон-глиального взаимодействия

И.В. Нуйдель, М.Е. Соколов, О.В. Шемагина

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород; email: nuidel@appl.sci-nnov.ru

Роль глии в регулировании нейронной активности

Человеческий мозг – одна из наиболее сложных систем, содержащая примерно 100 миллиардов нейронов, соединенных в сложную нейронную сеть [1]. Понимание, как мозг, сложная биологическая система, решает задачи и обрабатывает информацию кооперативным способом посредством нейронных сетей, – одна из фундаментальных задач современных научных исследований. Особую сложность этой задаче придают огромное число элементов системы (гены, протеины, ферменты в биологических клетках или миллиарды нейронов в мозге) и сложный способ, с помощью которого они организованно функционируют.

Сравнительно недавно было обнаружено, что в регулировании нейронной активности могут играть роль глиальные клетки мозга. В отличие от нейронов, способных генерировать электрический импульс (потенциал действия) в ответ на внешнюю стимуляцию, глиальные клетки не обладают свойством электровозбудимости.

Однако глиальные клетки играют важную роль в функционировании мозга, обеспечивая поддержку нейронной активности. Было показано, что глиальные клетки (в частности, астроциты) способны генерировать различные сигналы химической активности (кальциевые осцилляции, кальциевые волны). Химические сигналы в астроцитах носят характер импульсных возбуждений, однако имеют существенно больший временной масштаб (~1 с) по отношению к нейронным импульсам (~1 мс).

Показано, что увеличение внутриклеточной концентрации кальция в астроците приводит к изменению концентрации нейроактивных веществ во внеклеточном пространстве [1].

Показано, что астроциты окружают наиболее функционально активные синапсы и одна глиальная клетка может взаимодействовать с 2000–6000 синаптическими контактами.

Расстояние между мембраной глиальных клеток и синаптическим контактом составляет менее чем 1 мкм. Из-за близкого взаимного расположения нейропередатчик, высвободившийся из пресинаптического окончания, способен воздействовать как на постсинаптическое окончание, так и на мембрану глиальной клетки, т. е. нейрон-глиальное взаимодействие взаимно.

Было показано, что набор транспортеров на мембране отростка астроцита, окружающей синапс, в точности соответствует типам нейропередатчиков, выделяемых в данном синапсе [1, 5]. Благодаря этому мембраны глиальной и постсинаптической клеток практически идентичны для воздействия нейропередатчиков, высвобождаемых в процессе синаптической передачи.

Нейропередатчик, высвободившийся из пресинаптического окончания, активирует рецепторы на постсинаптической и астроцитарной мембранах, индуцируя генерацию потенциала действия в нейроне и кальциевого импульса в астроците. Глиальные клетки способны не только генерировать кальциевые сигналы в ответ на передачу информации в нейронной сети, но и различать уровни нейрональной активности. Однако высокочастотная стимуляция приводит к генерации повторяющихся кальциевых импульсов в астроцитах, частота которых прямо пропорционально зависит от частоты или интенсивности стимуляции.

Астроциты также могут принимать участие в модуляции долговременных синаптических изменений [1, 5].

Астроциты, с одной стороны, генерируют кальциевые сигналы за счет интегрирования синаптической активности в разных синаптических контактах, а с другой – формируют локализованное в пространстве повышение глиапередатчиков, которые воздействуют на синапсы нейронов, относящихся к разным нейрональным сетям. Такая астроцитарная регуляция нейрональной активности может приводить к синхронизации процессов синаптической передачи в группах нейронов. Необходимо отметить, что астроциты, подобно нейронам, также формируют сети [4], связь в которых между клетками осуществляется преимущественно локально (с ближайшими соседями) через щелевые контакты.

Таким образом, глия играет важную роль в регулировании нейронной активности.

Популяционная модель микроскопического модуля коры

В группе автоволновых процессов разрабатывается экспериментальный образец программного обеспечения, предназначенный для использования специалистами научных институтов, фармакологических компаний, медицинских и учебных учреждений, которые проводят исследование передачи нервной активности в кортикальных структурах головного мозга; изучение коллективной динамики нейронных, астроцитарных и нейрон-глиальных сетей; выявление фармакологического действия медикаментов на активность СНГС в кортексе и т. д.

Для теоретического рассмотрения селективных свойств коры по отношению к различным стиму-

лам использовалась теоретическая модель ее участков как двумерных плоских слоев, состоящих из большого количества нейроноподобных однотипных активных пороговых элементов, взаимодействующих между собой через возбуждающие и тормозные связи. Средние параметры популяции клеток, входящих в каждый активный элемент, описывают его состояние. Возможность использования такого модельного подхода опирается на известные экспериментальные данные: при диаметре микроколонки $d = 30\cdot10^{-6}$ м в нее входят до 80–100 нейронов, расположенных на пяти клеточных уровнях; при этом микроколонки объединены в макромодули (макроколонки) $D = (500–100)\cdot10^{-6}$ м, содержащие ~100 микроколонок.

В приближении однородности параметров рассматриваемых активных элементов такая модель одного слоя описывается приведенными ниже уравнениями на основе систем уравнений, исследуемых с середины 80-х годов [2, 3].

Воспользуемся данными, которые приведены для модуля из четырех слоев коры в макроколонке (рис. 1) [4].

В каждом слое в соответствии со схемой на рис. 1 учитывается влияние друг на друга популяции возбуждающих пирамидных клеток (система (1), переменная E), популяции тормозных (ингибиторных) интернейронов (переменная I) и глиальных клеток (переменная A) в слое и взаимное влияние слоев, схема которого составлена по данным измерений активности реальных клеток внутри слоев.

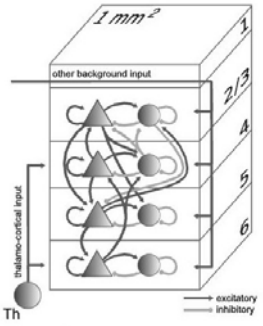


Рис. 1. Схема связей между слоями коры [4]. Треугольники – пирамидные клетки. Черным цветом показаны возбуждающие связи, серым цветом – интернейроны соответствующих уровней коры и тормозные связи

Переменные $E(t)$, $I(t)$ имеют смысл относительного количества возбужденных волокон в малом объеме в момент времени t и пропорциональны количеству импульсов, распространяющихся по нервным путям клеток соответствующего слоя (далее в тексте – активность возбуждающих и тормозных нейронов).

Активация клеток происходит внешним стимулом. Входной (внешний) сигнал $S_{\text{вх}}(\vec{r}, t)$ (в общем случае многомерный) через нейроны специфического (релейного) ядра таламуса (*Th* на рис. 1) по таламокортикальному пути поступает в шестой и четвертый слои коры. Например, двумерный зрительный сигнал проходит первичную обработку в зоне первичной зрительной коры.

На примере четвертого слоя микроколонки коры приведено подробное объяснение переменных и коэффициентов популяционной модели для одного активного элемента.

$$\frac{dE_4}{dt} = -\frac{E_4}{\tau_4} +$$

$$+ k_4(A_4)\cdot F_4\left[-T_4 + k_{T4}E_T + k_{44}(A_4)\cdot E_4\cdot\frac{Z_6}{\left|Z_4 + A_4(0)\cdot\frac{\tilde{\tau}_{E_4Z_{E_4}}}{\tilde{\tau}_{A_4Z_{E_4}}}\right|} - k_{I_44}\cdot I_4\right],$$

$$\frac{dI_4}{dt} = -\frac{I_4}{\tau_{I_4}} + k_{I_4}(A_4)\cdot F_{I_4}\left[-T_{I_4} - k_{I_4I_4}I_4 + k_{4I_4}E_4\right],$$

$$\frac{dA_4}{dt} = -\frac{A_4}{\tau_{A_4}} + k_{A_4}\cdot F_{A_4}\left[-T_{A_4} + k_{6A_4}E_6 - k_{I_4A_4}I_4\right],$$

$$\frac{dZ_4}{dt} = -\frac{Z_4}{\tilde{\tau}_{Z_{E_4}}} - \frac{E_4}{\tilde{\tau}_{E_4Z_{E_4}}} + \frac{A_4}{\tilde{\tau}_{A_4Z_{E_4}}}. \qquad (1)$$

Здесь E_4, I_4, A_4 – активность пирамид (возбуждающих нейронов), интернейронов (тормозных нейронов) и глиальных клеток четвертого слоя коры; E_T – внешний сигнал с таламуса; Z_4 – энергетическая функция, характеризующая содержание АТФ в нейронах слоя. Состояние глиальных клеток определяет содержание АТФ в соответствующих клетках. Энергетический запас уменьшается в процессе роста активности нейронов и увеличивается благодаря влиянию глии, например, известно, что способность астроцитов выделять молекулы глиотрансмиттеров во внеклеточное пространство, влияющих на нейрональную активность, была обнаружена около двух десятилетий назад, поэтому было сделано предположение, что астроцитарные клетки участвуют в нейрональных сетевых процессах [5].

$\tau_4, \tau_{I_4}, \tau_{A_4}$ – характерные времена затухания начального возмущения пирамид, интернейронов, глиальных клеток четвертого слоя коры при $F_i = 0$; $k_4(A_4), k_{I_4}(A_4)$ – плотность активируемых пирамид и интернейронов, зависящая от активности глиальных клеток в слое; k_{A_4} – плотность глиальных клеток в слое; F_4, F_{I_4}, F_{A_4} – нелинейная пороговая функция типа конечного скачка, например сигмоидальная функция (аналог постсинаптического потенциала на соответствующих клетках); T_4, T_{I_4}, T_{A_4} – пороги активации пирамид, интернейронов и глиальных клеток; k_{T4} – плотность расположения возбуждающих синапсов таламуса на возбуждающих нейронах четвертого слоя пирамид; k_{44} – плотность расположения синапсов пирамид четвертого слоя на пирамидах этого же слоя; k_{I_44} – плотность расположения синапсов интернейронов четвертого слоя на пирамидах этого же слоя; $k_{I_4I_4}, k_{4I_4}$ – плотности расположения синапсов интернейронов и пирамид четвертого слоя на интернейронах этого же слоя.

Результаты расчетов на точечной модели

Точечная модель (1) описывает состояние четвертого слоя микроколонки коры.

Влияние глии (A_4) на генерацию импульсов в четвертом слое микроколонки. Для расчета режимов генерации импульсов в четвертом слое микроколонки модель редуцирована до четырех уравнений (1). Учитывается влияние глии (A_4), внутренняя АТФ в слое (Z_4) возбуждающих нейронов (E_4). Параметры модели подобраны так, что активность переменной A_4 убывает, т. е. уменьшается подпитка энергией для нейронов извне. Начальные условия E_t = 0,25. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат активность в безразмерных единицах: графики синего цвета (сплошная линия) E_4, голубого (пунктирная линия) – I_4, красного (штрихпунктирная линия, на рисунке вверху) – A_4, зеленого (штрихпунктирная линия, на рисунке внизу) – Z_4 (рис. 2).

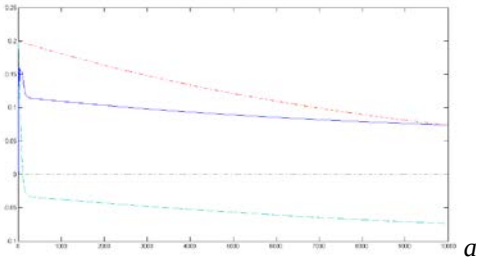
Рассматривается, как на продолжительность импульсной активности влияют следующие параметры системы: сила связи возбуждающих нейронов внутри слоя k_{44}; плотность возбуждающих нейронов k_4 в слое.

Продолжительность импульсной активности в слое увеличивается при увеличении силы связи возбуждающих нейронов внутри слоя k_{44}. Прекращение импульсной активности связано со спаданием активности глии от заданной начальной активности $A_4(0) = 0,2$.

При определенных параметрах функции силы связи возбуждающих нейронов внутри слоя k_{44} = = 1,594 и связи возбуждающих нейронов в слое k_6 = 2 весь слой переходит в возбужденное стационарное состояние (синяя линия, рис. 2, *ж*), нет импульсной активности. При этом активность глии (A_4) уменьшается (красная линия) и содержание внутренней АТФ (Z_4, зеленая линия) равны нулю.

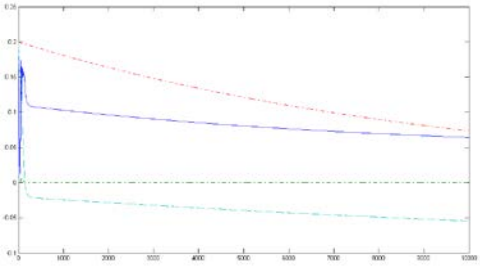
Это режим самовозбуждения.

Вызвать импульсную активность в такой системе можно, «отравив» часть возбуждающих нейронов, т. е. уменьшив их плотность $k_4 = 1$ (рис. 2, *ж*).



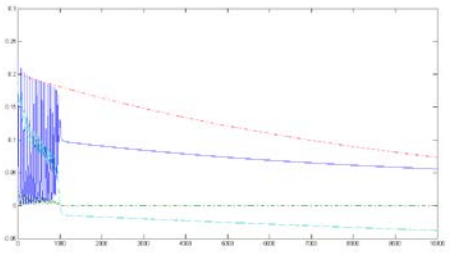
а

$k_4 = 2,\ k_{44} = 0,1$



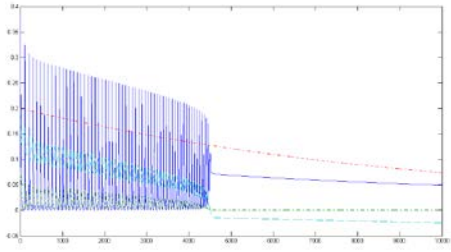
б

$k_4 = 2,\ k_{44} = 0,2$



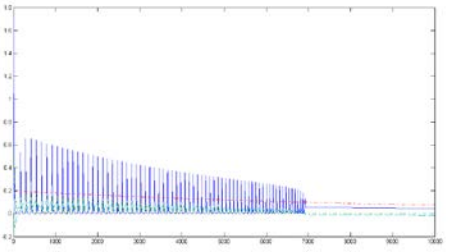
в

$k_4 = 2,\ k_{44} = 0,4$



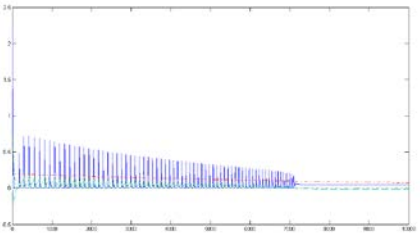
г

$k_4 = 2,\ k_{44} = 0,8$



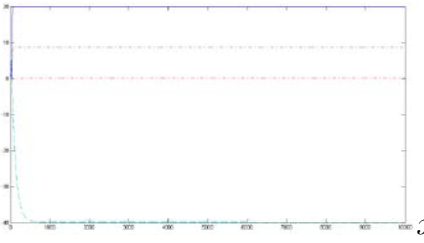
д

$k_4 = 2,\ k_{44} = 1,5$



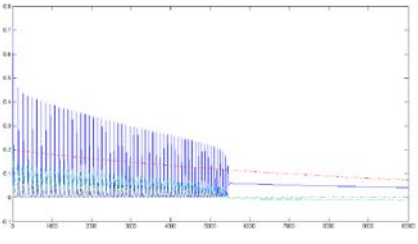
е

$k_4 = 2,\ k_{44} = 1,593$



ж

$k_4 = 2,\ k_{44} = 1,594$



з

$k_4 = 1,\ k_{44} = 1,594$

Рис. 2. Влияние силы связей возбуждающих нейронов внутри слоя k_{44} на продолжительность импульсной активности в слое при постоянной плотности возбуждающих нейронов k_4 = 2 (*а*–*ж*) и при изменении плотности возбуждающих нейронов k_4 = 1 (*з*)

Возникновение импульсной активности в четвертом слое микроколонки при увеличении активности глии. Влияние глии (A_4), учет внутренней АТФ (Z_4) возбуждающих нейронов (E_4). Возникновение импульсной активности (A_4 увеличивается). Как было показано выше, режим импульсной активности, наряду с другими параметрами, определяется функцией активности глии. Возрастание активности глии (красная линия на графике) вызывает импульсную активность нейронов слоя (рис. 3).

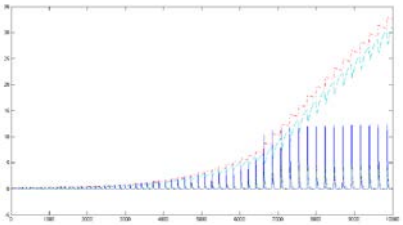


Рис. 3. Возникновение импульсной активности с увеличением активности глии

Возникновение пачечной импульсной активности в четвертом слое микроколонки в системе с учетом кальциевых волн в глии. Для расчета режимов генерации импульсов в четвертом слое микроколонки модель редуцирована до четырех уравнений (2). Учитывается влияние глии (A_4), внутренней АТФ в слое (Z_4) возбуждающих нейронов (E_4). Активность глии меняется с учетом медленных кальциевых волн в глии. Начальные условия $E_t = 0,25$.

$$\frac{dE_6}{dt} = -\frac{E_4}{\tau_4} +$$

$$+ k_4(A_4)\cdot F_4\left[-T_4 + k_{T4}E_T + k_{44}(A_4)\cdot E_4 \cdot \frac{Z_6}{\left|Z_4 + A_4(0)\cdot\frac{\tilde{\tau}_{E_4Z_{E_4}}}{\tilde{\tau}_{A_4Z_{E_4}}}\right|} - k_{I_4 4}\cdot I_4 + k_{A_{I_4}4}\cdot A_4 - k_{A_{I_4}4}\cdot A_4\right],$$

$$\frac{dI_4}{dt} = -\frac{I_4}{\tau_{I_4}} + k_{I_4}(A_4)\cdot F_{I_4}\left[-T_{I_4} - k_{I_4I_4}I_4 + k_{4I_4}E_4\right],$$

$$\frac{dA_4}{dt} = -\frac{A_4}{\tau_{A_4}} + k_{A_4}\cdot F_{A_4}\left[-T_{A_4} + k_{4A_4}E_4 - k_{I_4A_4}I_4 + F(t)\right],$$

$$\frac{dZ_4}{dt} = -\frac{Z_4}{\tilde{\tau}_{Z_{E_4}}} - \frac{E_4}{\tilde{\tau}_{E_4Z_{E_4}}} + \frac{A_4}{\tilde{\tau}_{A_4Z_{E_4}}}. \qquad (2)$$

Здесь $F(t)$ – функция, задающая зависимость волн выброса кальция в глиальных клетках, например $F(t) = K_{\text{Ca}}\cdot\cos(t\cdot 2\pi/T_{\text{Ca}})$.

В параметрах модели функция срабатывания глиальных элементов задаются формулами

$$F_{A_4}\left[-T_{A_4} + F(t)\right] = F_{A_4}\left[-0,962 + \cos(t\cdot 2\pi/5000\right], \quad (3)$$

$$F_{A_4}\left[-T_{A_4} + F(t)\right] = F_{A_4}\left[-0,884 + \cos(t\cdot 2\pi/3000\right], \quad (4)$$

$$F_{A_4}\left[-T_{A_4} + k_{4A_4}E_4 - k_{I_4A_4}I_4 + F(t)\right] = \\ = F_{A_4}\left[-0,925 + \cos(t\cdot 2\pi/3000 + 0,5\cdot E_4 - I_4\right]. \qquad (5)$$

Параметры кальциевых волн определяют активность возбуждающих и тормозных нейронов в колонке (рис. 4–7).

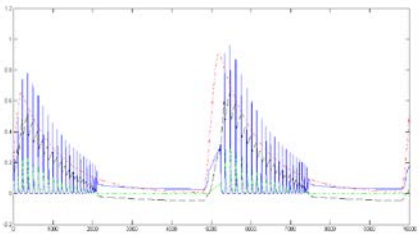


Рис. 4. Возникновение импульсной активности с учетом кальциевых волн в глии

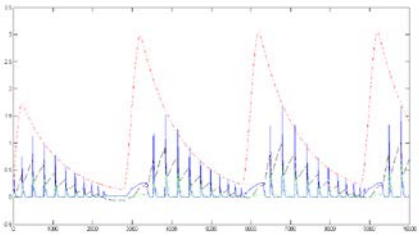


Рис. 5. Возникновение импульсной активности с учетом кальциевых волн в глии с изменением параметров кальциевых волн

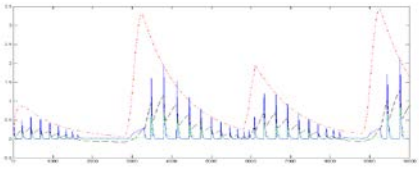


Рис. 6. Пример расчета при T = 0,925; $\omega = 2\pi/3000$ – частота функции, задающей зависимость волн выброса кальция в глиальных клетках; влияние глии на активность тормозных клеток слоя $k_{I_4A_4} = 1$ (см. (5))

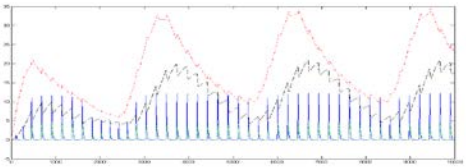


Рис. 7. Пример расчета при T = 0,3; $\omega = 2\pi/3000$ – частота функции, задающей зависимость волн выброса кальция в глиальных клетках; влияние глии на активность тормозных клеток слоя $k_{I_4A_4} = 0,5$ ослаблено, по сравнению с предыдущим расчетом

Режим пачечной импульсной активности переходит в режим генерации импульсов. В параметрах модели функция срабатывания глиального элемента задана формулой

$$F_{A_4}\left[-T_{A_4} + k_{4A_4}E_4 - k_{I_4A_4}I_4 + F(t)\right] = \\ = F_{A_4}\left[-0,3 + \cos(t\cdot 2\pi/3000 + 0,5\cdot E_4 - 0,5\cdot I_4\right]. \qquad (6)$$

При различных параметрах переменной глии наблюдаем периодическое возникновение импульсной активности.

Выводы

1. Разработана версия интегральной модели модуля микроколонки (1), описывающая взаимодействие ансамблей возбуждающих, тормозных

нейронов, глиальных клеток и уровней их «энергетического» обеспечения.

2. Проведены расчеты динамических режимов преобразования внешних сигналов в нескольких редуцированных моделях, при этом приведены лишь тестовые примеры из потенциально возможного набора режимов.

Разработанная версия интегральной математической модели обработки сигналов в нейронах и глиальных клетках и экспериментальный образец программного обеспечения позволяют проводить широкий спектр исследовательских работ по моделированию передачи нервной активности в сверхбольших нейрон-глиальных сетях кортикальных структур головного мозга.

Разработанное программное обеспечение дает возможность составлять каталог режимов функционирования нейрон-глиальных ансамблей, а также давать описание и интерпретации для изучаемой системы в биофизических или нейрофизиологических терминах.

Литература

1. *Hamilton N.* [*et al.*]. Mechanisms of ATP- and glutamate-mediated calcium signaling in white matter astrocytes // Glia. 2008. Vol. 56, № 7. P. 734–749.

2. *Кудряшов А.В., Яхно В.Г.* Распространение областей повышенной импульсной активности в нейронной сети // Динамика биологических систем. 1978. Вып. 2. С. 45–59.

3. *Яхно В.Г.* Модели нейроноподобных систем. Динамические режимы преобразования информации // Нелинейные волны'2002 / отв. ред. А.В. Гапонов-Грехов, В.И. Некоркин. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2003. С. 90–114.

4. *Potjans T.C., Diesmann M.* The cell-type specific cortical microcircuit: relating structure and activity in a full-scale spiking network model // Cerebral Cortex March. 2014. Vol. 24. P. 785–806 ; doi:10.1093/cercor/bhs358.

5. *Hassinger T.* [*et al.*]. An extracellular signaling component in propagation of astrocytic calcium waves // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1996. Vol. 93. P. 13 268–13 273 ; doi:10.1073/pnas.93.23.13268.

Становление электродинамики как модельный эволюционный эксперимент. Часть 2. Мучительная проблема истинности животного электричества

В.М. Ольшанский

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва; email: vmolsh@yandex.ru

Введение

В презентации «Становление электродинамики как модельный эволюционный эксперимент», представленной на конференции 2017 года, было дано определение электродинамики как разновидности когнитивной деятельности, специализирующейся на формировании у особей вида Homo sapience представлений об электромагнитных явлениях и возможности их использования в интересах особей Homo sapience. Были обозначены цели, которые ставились автором при подготовке презентации:

1. Следует всячески способствовать навыкам чтения и обсуждения оригинальных трудов классиков науки.

2. Электродинамике не следует продолжать линию на самоизоляцию от биологии. Связи физики с эволюционной теорией, связи электричества с нервной системой и жизнью должны найти отражение в школьных и вузовских учебниках.

3. Эволюционная теория (теории Дарвина), а также эволюционная история науки и техники, в частности эволюционная история электродинамики, должны стать обязательными полноценными предметами физико-технического образования.

Эти три цели иллюстрировались цитатами из Максвелла, Фарадея и Дарвина. По ходу изложения система мира, предложенная Ньютоном (и по сути, поддержанная Эйнштейном), сопоставлялась с эволюционным подходом Дарвина. Подробно излагались открытия Луиджи Гальвани, послужившие отправной точкой становления электродинамики.

Спор между Вольтой и Гальвани

Продолжение разговора требует изложение спора между Вольтой и Гальвани о сути сделанных Гальвани открытий. Гальвани существенно расширил представления о масштабе распространенности электрических явлений. Он утверждал, что любая мышца, любой орган чувств – это место, где текут гальванические токи. Вольта первоначально согласился с аргументами Гальвани, но позже пришел к заключению и подтвердил экспериментами, что источником электричества в опытах Гальвани с лягушками был «простой контакт двух металлов». В 1794 г. Вольте была вручена медаль Копли с формулировкой «За несколько сообщений с объяснениями определенных опытов, опубликованных профессором Гальвани». Животное электричество отрицалось, однако масштаб электрических явлений стал даже шире – в любом контакте. После изобретения вольтова столба, не содержащего ничего живого, но при этом генерирующего ток, мнение о том, что электричество свойственно не живой, а косной материи, стало очень распространенным.

Животное электричество как посредник между внутренним и внешним миром

В споре о существовании животного электричества была еще одна сторона, помимо объяснения механизма ощущений или мышечных сокращений. В большинстве европейских языков слово «животное» звучит как animal или animale. В нем явно присутствует anima – душа. Признание животного электричества означало признание посредника между душой и телом. Основания полагать, что Гальвани именно так представлял животное электричество, в трактате были. Но если быть честными, то претензии надо было бы предъявлять не Гальвани, а Ньютону, трактат которого заканчивался словами: «Теперь следовало бы кое-что добавить о некотором тончайшем эфире, проникающем во все сплошные тела и в них содержащемся, коего силой и действиями частицы тел при весьма малых расстояниях взаимно притягиваются, а при соприкосновении сцепляются, наэлектризованные тела действуют на большие расстояния, как отталкивая, так и притягивая близкие малые тела, свет испускается, отражается, преломляется, уклоняется и нагревает тела, возбуждается всякое чувствование, заставляющее члены животных двигаться по желанию, передаваясь именно колебаниям этого эфира от внешних органов чувств мозгу и от мозга мускулам. Но это не может быть изложено вкратце, к тому же нет и достаточного запаса опытов, коими законы действия этого эфира были бы точно определены и показаны». Однако как во времена Вольты, так и в следующем веке сторонники изгнания живого духа из естественной науки предпочитали обвинять Гальвани и не упоминать Ньютона.

Опыты Фарадея на электрических угрях

Статью Фарадея «Заключение о характере направления электрической силы у электрического угря» не приводят в числе главных научных трудов отца электричества. Между тем Фарадей открывает ею второй том своих «Экспериментальных исследований по электричеству» и подчеркивает, что перепечатывает ее без каких-либо изме-

нений по сравнению с первой публикацией. Речь в ней идет о том, что представляет собой электрический орган электрического угря и какое соотношение между грубым электрическим и более тонкими нервными флюидами. Возможно ли взаимное преобразование между ними и не является ли такая трансформация основной функцией электрических органов электрических рыб? Можно ли на этот вопрос ответить прямыми экспериментами? Все эти вопросы ставятся прямо и исследуются прямо: «И вот, хотя я еще пока не убежден фактами в том, что нервная жидкость есть одно только электричество, все же я думаю, что агентом в нервной системе может быть неорганическая сила; и если есть основания предполагать, что магнетизм является более высокой степенью силы, чем электричество, то легко можно вообразить, что нервная сила имеет еще более возвышенный характер и все же доступна опыту.

1792. Опыт, который я имею смелость предложить, состоит в следующем: если угорь или скат был утомлен частым действием своего электрического органа, то можно ли, пропуская через него токи, по силе подобные тем, которые он сам испускает, или другой степени силы, постоянные или прерывные и в том же направлении, как и те, которые он испускает, восстановить его способность и силы быстрей, чем если предоставить его естественному отдыху?»

Казалось бы, результат этих исследований очевидно отрицателен, но именно эти исследования непосредственно предшествуют следующей работе – «Об источнике мощности гальванического элемента», в которой обозначен переход от механических сил Ньютона к «живым силам», в том числе электродвижущей, позже переименованным в энергии.

Карло Маттеуччи – апология Гальвани

Замечательный итальянский физик Карло Маттеуччи практически не представлен в русскоязычной литературе, хотя медаль его имени до сих пор относится к числу престижных и по фамилиям ее лауреатов можно рассказывать историю современной физики. Забавно, но кроме первого лауреата – Германа Гельмгольца, известного своими физиологическими открытиями, все остальные лауреаты не имели отношения к исследованию живого. Сам Маттеуччи явно воспринимал себя и воспринимался другими как профессиональный физик. Однако медаль Копли он получил за физиологические исследования и все его 11 мемуаров, опубликованных с 1745 по 1861 г. в Трудах Королевского общества, посвящены электрофизиологии. В споре Вольты с Гальвани Маттеуччи жестко встал на сторону Гальвани и показал, что многое из того, что так настойчиво отвергали Вольта и его апологеты, в реальности происходит в живых организмах. Более того, он открывает новое явление, явно недооцененное до сих пор – эффект индуцированного возбуждения.

Эксперименты Маттеуччи очень наглядны, его логика прозрачна. Но и от него, как и от Гальвани, оппоненты постоянно требуют: «Докажи, что это ИСТИННОЕ животное электричество!»

Заинтересованный читатель может самостоятельно проследить дальнейшую судьбу этой роковой проблемы.

Литература

1. *Дарвин Ч.* Сочинения. Т. 3. М. : Изд-во АН СССР, 1939. 270 с.
2. *Гальвани А., Вольта А.* Избранные работы о животном электричестве. М. ; Л. : ОГИЗ, 1937. 112 с.
3. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии. М. : Наука, 1989. 662 с.
4. *Вольта А.* Об электричестве, возбуждаемом простым соприкосновением различных проводящих веществ : письмо к сэру И. Банксу от 20 марта 1800 г. // *Радовский М.И.* Гальвани и Вольта. М. ; Л. : ГЭИ, 1941. С. 73–74.
5. *Фарадей М.* Экспериментальные исследования по электричеству. Т. 2. М. : Изд-во АН СССР, 1951. 539 с.
6. *Finger S., Piccolino, M.* The shocking history of electric fishes: from ancient epochs to the birth of modern neurophysiology. Oxford : Oxford University Press, 2011.
7. *Matteucci C.* Electro-physiological researches. Third memoir. On induced contractions // Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1845. V. 135. P. 303–317.
8. *Matteucci C.* Electro-physiological researches. Fifth series. Part 1. Upon induced contractions // Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1847. V. 137. P. 231–237.
9. *Matteucci C.* Electro-physiological researches. Sixth series. Laws of electric discharges of the torpedo and other electric fishes – theory of the production of electricity in these animals // Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1847. V. 137. P. 239–241.
10. *Moruzzi G.* The elecrophysiological work of Carlo Matteucci // Brain Research Bulletin. 1996. V. 40. P. 69–91.

Значение личностных качеств в проявлении характеристик принятия решений

А.В. Орлов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород;
email: ao1111@mail.ru

Начиная с сознательного возраста вся жизнь человека представляет собой непрерывный процесс принятия решений. Именно они определяют существование человека. Процесс принятия решения активно изучается в когнитивной психологии, описываются факторы, влияющие на эту деятельность. Важными для прогнозирования поведения человека являются исследования роли индивидуальных и стилевых характеристик личности в процессе принятия решения.

Целью данной работы является изучение того, как процесс принятия решений людьми связан с выраженностью у них некоторых личностных качеств, связанных с адаптацией. Под принятием решений в данном исследовании понимается особый процесс человеческой деятельности, направленный на выбор наилучшего варианта действий.

В качестве основного метода исследования мы выбрали субъективное самооценивание на основе шкалирования. При этом предполагается, что ретроспективный взгляд человека на свои действия в различных ситуациях позволяет ему составить представление о том, как он принимает решения. Конечно, это оценка не лишена субъективных искажений, однако она может быть достаточно достоверной, так как показывает обобщенную характеристику действий человека в естественных ситуациях, данную им самим. При самооценивании человек дает интегральную характеристику своих действий и проявлений на некотором уровне обобщения. Способность обобщать – основное свойство мышления, которое может осуществляться полуавтоматически и даже бессознательно, создавая внутреннюю более или менее полную картину «Я» в его различных проявлениях. Составление Я-концепции (системы представлений о себе) естественно для большинства людей. Представления о себе постоянно уточняются, корректируются, дополняются, формируя достаточно полный образ себя в тех или иных видах деятельности. Кроме того, в процессе обобщения человеком, как правило, отбрасываются отдельные ситуативные способы его реагирования в специфических обстоятельствах, а в образ себя вносятся наиболее устойчивые диспозиции и типичные алгоритмы действия, характерные для большинства ситуаций.

Нами был разработан опросник «Самооценивание принятия решения», в котором перечислены доступные для самонаблюдения и рефлексии характеристики принятия решения. Это такие показатели, как скорость принятия решения, глубина анализа, информированность (использование как можно большего объема информации для принятия решения), оперативность осмысления новой информации, самокритичность и осторожность в принятии решения и др.

Разработка методики изначально имела индуктивную стратегию: респондентам было предложено описать то, как они принимают решения в свободной форме. В дальнейшем с помощью процедуры контент-анализа были выделены ключевые характеристики, по которым процесс принятия решения может описать как человек, осуществляющий самонаблюдение, так и внешний наблюдатель. Был построен опросник из 72 пунктов по типу биполярной шкалы с альтернативными утверждениями, характеризующими противоположные тенденции в процессе принятия решений. С помощью первичного варианта опросника проведено поисковое исследование по самооцениванию респондентами процесса принятия решения. Результаты самооценивания были подвергнуты процедуре факторного анализа, посредством которого были выделены 4 ключевые характеристики, описывающие процесс принятия решения:

- быстрое или медленное принятие решения,
- тщательная или нетщательная обработка информации,
- потребность в большом или небольшом количестве информации,
- критичность или некритичность к собственному решению.

В дальнейшем с помощью коэффициента α Кронбаха и экспертного оценивания количество утверждений было сокращено до 12 наиболее надежных и содержательно валидных, сгруппированных в шкалы по 3 утверждения.

Окончательный вариант методики имеет вид опросника, с помощью которого респондент описывает то, как он принимает решения. Методика показывает 4 основные характеристики или склонности принятия решения и соответственно 4 шкалы:

1. Оперативность принятия решения – показатель того, насколько быстро принимается решение.

2. Обдумывание информации – показатель того, насколько детально и глубоко полученная информация осмысливается для принятия решения. Чем выше балл, тем меньше глубина анализа информации при принятии решения, менее тщательная работа над принятием решения.

3. Информированность, потребность в большом количестве информации – показатель того, насколько много респонденту нужно информации для принятия решения.

4. Самокритичность при принятии решения – показатель того, насколько сомневается респон-

дент в собственном решении и нуждается ли он в коллективном обсуждении вопроса.

Респондента просят ответить на утверждения опросника. При этом могут быть заданы разные ситуации. На основании результатов самооценивания делается вывод о том, как респондент характеризует принятие решений в данных типах ситуаций.

В исследовании мы просили соотнести принятие решение с двумя ситуациями и, соответственно, дважды ответить на опросник:

1) ситуация 1 – обычная ситуация, спокойная обстановка,

2) ситуация 2 – стресс, напряжение, критическая ситуация.

Для оценки конструктной валидности данного опросника мы провели корреляционный анализ для изучения взаимосвязи рациональности респондентов с проявлением у них характеристик принятия решений по методике «Самооценивание принятия решения». Рациональность мы определяли по методике «Личностные факторы принятия решений» Т.В. Корниловой [3]. В данной методике под рациональностью понимается готовность обдумывать свои действия и действовать по максимально полной ориентировке в ситуации. Нами установлены достоверные ($p < 0,05$) корреляции между рациональностью и характеристиками принятия решений по методике «Самооценивание принятия решения». Чем больше выражена рациональность у субъекта, тем меньше скорость принятия решений, больше потребность в значительном количестве информации, выше тщательность обдумывания информации и выше самокритичность. Это подтверждает конструктную валидность методики «Самооценивание принятия решения», что позволяет ее использовать в исследовательских целях.

Также в исследовании использовались опросник «Толерантность к неопределенности» С. Баднера [6], методики «Толерантность-интолерантность к неопределенности» Т.В. Корниловой [4], опросники «Симптомы неадекватной самооценки» А.В. Орлова [5], «Диагностика уровня личностной готовности к риску» А. Шуберт [7], «Опросник оценочной тревожности» Ч. Спилбергера [6].

В исследовании участвовали 70 студентов (юношей и девушек). Использовался корреляционный анализ с помощью коэффициента Спирмена. Сравнительный анализ осуществлялся с использованием коэффициента *U* Манна – Уитни.

Сравнение юношей и девушек показало, что они достоверно отличаются по некоторым характеристикам. В обычных ситуациях девушки по сравнению с юношами проявляют меньше самокритичности и осторожности в процессе принятия решений. Юноши более критичны и в большей степени склонны прислушиваться к альтернативной точке зрения или к мнению других субъектов. Различия достоверны при $p < 0,01$. В ситуациях стресса юноши демонстрируют потребность в большем количестве информации, чем девушки. Достоверность различий $p < 0,001$.

Основной задачей исследования является попытка определить, как характеристики принятия решений в оценке респондентов связаны с проявлением у них некоторых личностных качеств. Мы выбрали для анализа качества, которые связаны с адаптивностью и готовностью активно действовать во внешней среде: тревожность, самооценку, волевые качества, толерантность к неопределенности и склонность к риску. Использовался корреляционный анализ по Ч. Спирмену. Установлены достоверные корреляции при $p < 0,05$, которые обсуждаются далее.

Изучалась взаимосвязь характеристик процесса принятия решений с оценочной тревожностью студентов, т. е. тревожностью, связанной с получением и воспроизведением знаний в условиях вуза. По методике Ч. Спилбергера выделяются две основные составляющие – беспокойство на экзамене и эмоциональность [2]. Достоверно установлено, что чем выше экзаменационная тревожность у респондентов, тем меньше склонность к тщательному обдумыванию информации в обычных ситуациях ($r = –0,37$). Вероятно, студенты, которые не склонны достаточно глубоко анализировать информацию, также не достаточно хорошо понимают то, что усвоили, и это может сказываться на тревожности в ситуации экзамена.

Мы также проанализировали взаимосвязь тревожности и ключевых параметров принятия решений в ситуации стресса. Установлено, что чем выше экзаменационная тревожность, тем ниже скорость принятия решений. Об этом говорят отрицательные достоверные коэффициенты корреляции (r от –0,53 до –0,55). Также показано, что в ситуации стресса беспокойство на экзамене и стремление тщательно обдумывать информацию взаимосвязаны ($r = –0,65$): чем больше беспокойство на экзамене, если он рассматривается студентом как стрессорная ситуация, тем больше стремление тщательно обдумывать информацию при принятии решения.

Также мы провели корреляционный анализ взаимосвязи характеристик принятия решений респондентов с проявлениями у них симптомов неадекватной самооценки. Установлено, что неадекватное отношение к жизни имеет отрицательные взаимосвязи с потребностью в большом количестве информации при принятии решений ($r = –0,37$). Это говорит о том, что чем больше выражены экзистенциальные проблемы человека (неудовлетворенность жизнью, своим положением), тем меньше ему нужно информации для принятия решений. Это может выражаться также и в том, что люди с такими симптомами неадекватной самооценки просто не проявляют должного внимания к ценности информации, по сравнению с теми людьми, у которых экзистенциальных проблем нет.

Также установлена достоверная отрицательная корреляция ($r = –0,39$) между наличием симптомов неадекватного отношения к жизни и оперативностью принятия решений. Она говорит о том, что чем больше выражены экзистенциальные проблемы, тем меньше скорость принятия реше-

ний. Но это установлено только для ситуаций стресса. Возможно, в экстремальных условиях у людей с экзистенциальными проблемами имеет место замедление мыслительных процессов и оперативность принятия решений снижается.

Также исследование показало, что потребность в большом количестве информации и тщательность обдумывания информации наиболее характерна для тех респондентов, у которых проявляются симптомы завышенной самооценки, предвзятости, социальной зависимости и самопрезентации (r от 0,35 до 0,56). На основании данных корреляционных связей мы можем предполагать, что люди, которые очень высокого мнения о себе, и люди, желающие понравиться окружающим, стремятся получить максимально полную информацию для принятия тех или иных решений.

Установлены также аналогичные зависимости между склонностью к тщательному обдумыванию информации и низкой самооценкой. Установленные отрицательные корреляции (r от –0,53 до –0,65) указывают на то, что чем более выражены симптомы заниженной самооценки или иррациональности в принятии решений, тем менее тщательно идет обдумывание этой информации респондентами.

Анализ ответов респондентов, которые они давали для ситуаций стресса, показывает, что влияние экстремальных условий сказывается прежде всего на скорости принятия решений. Отрицательные корреляции (r от –0,39 до –0,49) указывают на то, что чем более выражены экзистенциальные пробелы, симптомы заниженной самооценки, иррациональности и социальной изолированности, тем меньше скорость принятия решений. То есть, вероятно, для людей с заниженной самооценкой характерна низкая скорость принятия решений в ситуациях стресса.

В целом на основании данного анализа мы склонны предполагать, что наличие тех или иных симптомов неадекватной самооценки может сказываться на характере принятия решений.

Также мы провели исследования взаимосвязи проявления волевых качеств у респондентов по методике Зверькова [1], и характеристик принятия решений. Установлены для обычных (не стрессовых) ситуаций достоверные корреляции (r от 0,35 до 0,39) между настойчивостью личности и стремлением для принятия решения получить большее количество информации и высокой тщательностью ее обработки. Таким образом, мы можем предполагать взаимосвязь волевых качеств и процесса принятия решений.

Исследование взаимосвязи толерантности к неопределенности (спокойное к ней отношение) и склонности к риску респондентов с характеристиками принятия ими решений показало наличие отрицательных достоверных корреляций (r от –0,32 до –0,66). Они говорят о следующем: в обычных ситуациях чем выше толерантность к неопределенности и склонность к риску, тем меньше потребность в анализе большого количества информации и самокритичность при принятии решений; в ситуациях стресса чем выше толерантность к неопределенности и склонность к риску, тем меньше тщательность обдумывания информации при принятии решений.

На основании результатов анализа можно предполагать, что толерантность к неопределенности повышает скорость принятия решений, но отрицательно сказывается на качестве решений, а интолерантность к неопределенности (чувствительность к сложным, противоречивым и неясным ситуациям), наоборот, повышает потребность в количестве информации и способствует тщательности ее обработки.

На основании проведенного анализа можем предполагать, что личностные качества, связанные с адаптивностью индивидов (тревожность, самооценка, настойчивость), а также толерантность к неопределенности и склонность к риску могут быть взаимосвязаны с характеристиками оперативности и качества принятия решений. Так как результаты получены методом самооценивания, они нуждаются в дополнительных экспериментальных проверках.

Литература

1. *Зверьков А.Г.* Диагностика волевого самоконтроля (опросник ВСК) // Практикум по психодиагностике. Психодиагностика мотивации и саморегуляции. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1990. С. 116–124.

2. *Карандашев В.Н., Лебедева М.С., Спилбергер Ч.* Изучение оценочной тревожности : руководство по использованию методики Ч. Спилбергера. СПб. : Речь, 2004. 80 с.

3. *Корнилова Т.В.* Психология риска и принятия решений. М. : Аспект Пресс, 2003. 286 с.

4. *Корнилова Т.В.* Новый опросник толерантности к неопределенности // Психологический журнал. 2010. Т. 31, № 1. С. 74–86.

5. *Орлов А.В.* Связь самооценки студентов с их отношением к родителям // Вызовы эпохи в аспекте психологической и психотерапевтической науки и практики / под ред. С.В. Петрушина. Казань : Отечество, 2009. С. 477–482.

6. Психодиагностика толерантности личности / под ред. Г.У. Солдатовой, Л.А. Шайгеровой. М. : Смысл, 2008. 172 с.

7. *Фетискин Н.П., Козлов В.В., Мануйлов Г.М.* Социально-психологическая диагностика развития личности и малых групп. М. : Изд-во Ин-та психотерапии, 2002. 490 с.

Исследование дельта-, тета- и альфа-вызванной ритмической активности мозга человека в условиях сенсорной маскировки

М.А. Павловская

Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Ростов-на-Дону

Пространственное внимание определяет набор когнитивных механизмов, которые отфильтровывают нерелевантную поведенческую информацию [1]. Мозговая активность на различных частотах образует иерархию скоординированной деятельности, модулируя когнитивные процессы [2], увеличивая или подавляя обнаружение внешних раздражителей [3]. Предъявление стимула приводит к синхронизации или десинхронизации мозговой активности. Прекращение стимуляции приводит к затуханию колебаний. Частота и периодичность суперпозиции ритмов зависит от уровня бодрствования, внимания, значимости и модальности стимулов [4].

Предположительно, одним из механизмов работы мозга является фазово-амплитудная координация ритмов, лежащая в основе внимания [5–8], селективного внимания [8] и фильтрации [5], которая количественно определяет взаимосвязь между фазой низкочастотного сигнала и огибающей амплитуды высокочастотного сигнала. Высказано предположение, что низкочастотные колебания служат временными системами отсчета для более высокой частоты [9–12].

Фазово-амплитудная связь происходит в обоих гиппокампах [13] и неокортексе [14], что позволяет обрабатывать и передавать информацию по иерархии частотного диапазона [15]. Для измерения интенсивности фазово-амплитудной связи используют индекс модуляции [16].

Гипотеза связи через когерентность предполагает, что передача информации от одной области мозга к другой происходит при временно выровненных низкочастотных колебаниях [17]. Напротив, гипотеза гейтинга по ингибированию предполагает, что низкие частоты периодически подавляют информацию в популяции нейронов [18]. Однако наличие [8] или отсутствие [5] фазово-амплитудной связи в настоящее время остается дискуссионным.

Было показано, что дельта-ритм (1–3 Гц) в первичных сенсорных областях коры отражает процессы внимания [11], тета (4–7 Гц) и альфа (8–13 Гц) ассоциировались с постоянным вниманием [19, 20] и торможением [21, 22]. Дополнительные данные свидетельствуют о том, что дельта и альфа играют противоположные роли в избирательном внимании [23].

В работе [16] показано взаимодействие между тета-альфа-фазовой и бета-низкой-гамма-амплитудной корреляцией с временем реакции.

Исследования показали, что синхронизация мозговых колебаний в конкретных частотных диапазонах приводит к изменениям восприятия, внимания и рабочей памяти, которые можно объяснить с использованием теорий мультиплексирования [24] или взаимосвязи ритмов [25]. Следовательно, мозговые колебания могут способствовать обработке информации в мозге человека различными способами, создавая гибкую динамичную систему, работающую по принципу суперпозиции /синергичности или мультиплексирования [26, 27].

Однако в настоящее время отсутствуют данные о механизмах, лежащих в основе взаимодействия ритмической активности мозга в условиях предъявления одно- и разномодальной сенсорной маскировки, процедура которой является адекватной для изучения механизмов игнорирования или привлечения внимания к отдельным стимулам в паттерне. Не ясна функциональная роль взаимодействия вызванных дельта-, тета- и альфа-ритмов в условиях последовательной сенсорной маскировки.

В тестировании с добровольным письменным согласием приняли участие 68 студентов ЮФУ без патологий сенсорных систем. Были использованы процедуры прямой (маскер предшествует целевому стимулу) и обратной (целевой стимул предшествует маскеру) маскировок одной или разных модальностей. В ответ на целевые стимулы по инструкции необходимо было нажимать соответствующую клавишу датчика. Целевые слуховые стимулы предъявлялись с частотой 1 и 1,2 кГц, интенсивностью 60 дБ; зрительные – вспышки яркостью 9 кД, длительностью 1 мс; вероятность 0,15; 0,5 и 0,85. Слуховой маскер с частотой 1,1 кГц, интенсивностью 90 дБ; зрительный – 9 кД, 5 мс. Межмаскировочные интервалы были 0,3; 0,2; 0,1; 0,05 с. Регистрация ЭЭГ, времени реакции и режим стимуляции осуществлялись с помощью компьютерного энцефалографа-анализатора «Энцефалан-131-03» (Таганрог, Россия). Частотные интервалы адаптивной фильтрации для получения ритмических колебаний, соответствующих основным компонентам связанного с событием потенциала, составляли 0,5–3 Гц для дельта, 4–7 Гц – для тета, 8–13 Гц – для альфа и 14–24 Гц – для бета-диапазонов. Оцифрованная ЭЭГ экспортировалась в среду MATLAB, где проводилась дальнейшая обработка.

Использование амплитудно-временных характеристик основных компонентов связанного с событием потенциала (ССП) позволяет оценить лабильность внимания в сенсомоторном цикле. Сравнение амплитудно-временных показателей компонентов ССП, коррелирующих со стадиями ожидания, восприятия, принятия сенсорного и моторного решения, различения и моторного ответа на целевой стимул и игнорирования маскера, свидетельствуют о разном уровне внимания к стимулам в последовательности. В условиях раз-

личения амплитуда компонентов *N*1 на целевой стимул достоверно выше *N*1 на маскер (для слухового $F = 20{,}95$ в отведении *Fz*) и *N*1 в контрольной серии (при $p < 0{,}005$ и $F = 3{,}7$ в отведении *Fz*) независимо от модальности. Латентный период компонента *N*1 ССП при сокращении маскировочного интервала достоверно не менялся (при $p < 1$ и $F = 0{,}78$ в отведении *Fz*).

Сокращение вероятности целевого стимула приводило к росту амплитуды компонента негативности рассогласования.

Анализ изопотенциальных карт ССП показал, что стадия обнаружения целевого стимула представлена волной ожидания в центральной области, что связано со снижением порогов восприятия. Ожидание маскера сопровождается одновременным развитием позитивной волны во фронтальной области, что определяет механизм его игнорирования.

Стадия обнаружения стимула представлена негативностью во фронтальной области для слухового анализа и в париетальной – для зрительного. Различение стимулов сопровождается развитием двух негативных фокусов: в верхневисочных для слухового и нижнеезатылочных областях для зрительного стимула. Оба фокуса находятся в местах пересечения дорзальных и вентральных вторичных сенсорных путей. Далее развивалась позитивная волна в лобной и теменной областях в сагиттальных отведениях, обеспечивающих деактивацию двух систем внимания.

Завершение сенсомоторной интеграции соответствует одновременному формированию позитивных фокусов в лобной (*P*3*а*) и теменной (*P*3*б*) областях, расположенных сагиттально. Лобный фокус, преобладающий в условиях зрительной стимуляции в тета-диапазоне, вероятно, притормаживал процессы, связанные с произвольным контролем со стороны таламофронтальной системы. Теменной фокус, выраженный лучше при слуховом восприятии развивался в дельта-диапазоне (1–2 Гц), что, скорее всего, соответствовало процессам деактивации таламопариетальной системы. Далее было изучено взаимодействие фронтальной системы, проявляющейся в активации симметричных процессов негативно-позитивных тета-колебаний (*N*1, *P*2, *N*2, *P*3*а*) ССП, и париетальной, отражающейся в процессах развития дельта-колебаний (*CNV*, *MMN*, *P*3*б*) ССП. В условиях обратной маскировки маскер воздействовал на тета-колебания ССП, снижая эффективность деятельности. В условиях прямой маскировки маскер воздействовал на дельта-компонент ССП, оптимизируя сенсомоторную интеграцию.

Метод построения изопотенциальных карт основных компонентов позволил изучить локализацию фокусов максимальной активности стадий ожидания целевого стимула или игнорирования маскера, а также принятия решения и выполнения двигательного ответа на целевой стимул.

Адаптивная фильтрация дельта-, тета-, альфа- и бета-ритмов ССП, отражающих изменение корково-подкорковых и корково-корковых связей, в условиях одно- и разномодальной маскировки, скорее всего, позволяет изучить соотношение указанных ритмов в анализе целевого и маскирующего стимулов. Так, дифференцировка целевых стимулов связана с повышением дельта-ритма (рис. 1) и снижением тета-ритма (рис. 2) ССП, охватывающего волну ожидания, компоненты негативности рассогласования и *P*3*б*, независимо от модальности и порядка следования стимула. Сокращение вероятности приводит к росту выраженности дельта-волны ССП.

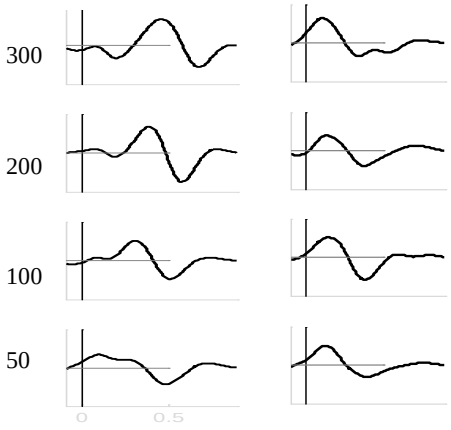


Рис. 1. Вызванная дельта-активность в условиях прямой (*А*) и обратной (*Б*) слуховой маскировки в отведении *Cz* при сокращении межмаскировочных интервалов (указаны слева)

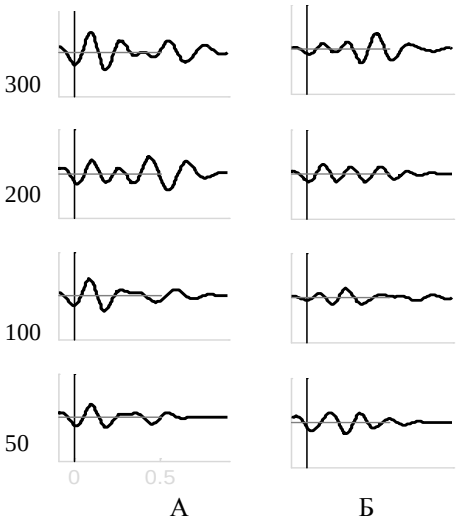


Рис. 2. Вызванная тета-активность в условиях прямой (*А*) и обратной (*Б*) слуховой маскировки в отведении *Cz* при сокращении межмаскировочных интервалов (указаны слева)

Восприятие маскера связано с десинхронизацией дельта-ритма и доминированием тета-ритма ССП, контролирующего компоненты *N*1, *N*2, *P*2 ССП, независимо от модальности и порядка следования стимула и, скорее всего, связано с ориентировочной реакцией на интенсивные физические параметры маскера.

Дельта-ритмический диапазон ССП высоко коррелирует с 2 Гц вызванным ритмом, тета – с 5 Гц, альфа-фронтальный – с 7–8 Гц, альфа-париетально-окципитальный – с 9–10 Гц.

Предполагается, что увеличение дельта-колебаний ССП связано с привлечением внимания к целевому стимулу, а тета – с игнорированием маскировочного стимула.

Флуктуация авторитмичности альфа-ритма ССП (лобный и теменно-затылочный фокусы) зависит от модальности, порядка следования и значимости стимула, которая модулирует или организует межмодальную сенсомоторную интеграцию посредством направления внимания на воспринимаемый стимул.

Таким образом, использование процедуры маскировки позволяет изучить взаимодействие таламофронтальной и таламопариетальной систем внимания. Таламофронтальная система контролирует формирование *N*1, *P*2, *N*2 и *P*3*a* компонентов ССП в диапазоне тета-колебаний, а таламопариетальная – волну ожидания, негативность рассогласования и компонент *P*3*б* в дельта-ритме. В условиях обратной маскировки маскер воздействовал в первую очередь на тета-колебания ССП, снижая эффективность деятельности таламофронтальной системы внимания. В условиях прямой маскировки маскер воздействовал на дельта-волну, формируя доминирующий очаг париетальных систем внимания. Рост вероятности стимулов увеличивает роль произвольного внимания на уровне как париетальных, так и фронтальных систем внимания.

Предполагаем, что механизм одномодальной маскировки в большей степени связан с динамикой возбудимости (рефрактерностью) исследуемого канала сенсорного анализа, а в условиях разномодальной маскировки – с механизмами коактивационной параллельной обработки и особенностями межсенсорной интеграции.

Литература

1. *Posner M.I.* Orienting of attention // Quarterly J. Exp. Psych. 1980. V. 32 (1). P. 3–25.
2. *Thut G., Miniussi C., Gross J.* The functional importance of rhythmic minireview activity in the brain // Current Biology. 2012. V. 22. P. 658–663.
3. *Schroeder C.E., Lakatos P.* Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection // Trends Neurosci. 2009. V. 32(1). P. 9–18.
4. *Pavlovskaya M.A.* Physiological mechanisms of intermodal interactions in the sensory masking // Int. J. Psychophysiol. 2014. V. 94, iss. 2. P. 205.
5. *Esghaei M., Reza Daliri M., Treue S.* Attention decreases phase-amplitude coupling, enhancing stimulus discriminability in cortical area MT // Frontiers in Neural Circuits. 2015. V. 9. Art. 82.
6. *Landau A.N., Marianne S.H., Van Pelt S., Fries P.* Distributed attention is implemented through theta-rhythmic gamma modulation // Current Biology. 2015. V. 25 (17). P. 2332–2337.
7. *Schroeder C.E., Lakatos P.* Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection // Trends in Neurosciences. 2009. V. 32 (1). P. 9–18.
8. *Szczepanski S.M. [et al.].* Dynamic changes in phase-amplitude coupling facilitate spatial attention control in fronto-parietal cortex // PLoS Biology. 2014. V. 12 (8). Art. e1001936.
9. *Bonnefond M., Kastner S., Jensen O.* Communication between brain areas based on nested oscillations // Eneuro. 2017. V. 4 (2). Art. e0153.
10. *Canolty R.T., Knight R.T.* The functional role of cross-frequency coupling // Trends Cog. Sci. 2010. V. 14 (11). P. 506–515.
11. *Lakatos P. [et al.].* Entrainment of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection // Science. 2008. V. 320 (5872). P. 110–113.
12. *Mizuseki K., Sirota A., Pastalkova E., Buzsaki G.,* Theta oscillations provide temporal windows for local circuit computation in the entorhinalhippocampal loop // Neuron. 2009. V. 64 (2). P. 267–280.
13. *Buzsáki G., Watson B.O.* Brain rhythms and neural syntax: implications for efficient coding of cognitive content and neuropsychiatric disease // Dialogues Clin. Neurosci. 2012. V. 14(4). P. 345–367.
14. *Lakatos P. [et al.].* An oscillatory hierarchy controlling neuronal excitability and stimulus processing in the auditory cortex // J. Neurophysiol. 2005. V. 94. P. 1904–1911.
15. *Calderone1 D.J., Lakatos P., Butler P.D., Castellanos F.X.* Entrainment of neural oscillations as a modifiable substrate of attention // Trends Cogn. Sci. 2014. V. 18(6). P. 300–309.
16. *Chacko R.V. [et al.].* Distinct phase-amplitude couplings distinguish cognitive processes in human attention // J. NeuroImage. 2018. V. 175. P. 111–121.
17. *Fries P.* A mechanism for cognitive dynamics: neuronal communication through neuronal coherence // Trends Cogn. Sci. 2005. V. 9. P. 474–480.
18. *Jensen O., Mazaheri A.* Shaping functional architecture by oscillatory alpha activity: gating by inhibition // Frontiers in Human Neuroscience. 2010. V. 4 (Nov.). P. 186.
19. *Clayton M.S., Yeung N., Cohen Kadosh R.* The roles of cortical oscillations in sustained attention // Trends Cogn. Sci. 2015. V. 19 (4). P. 188–195.
20. *Sadaghiani S., Kleinschmidt A.* Brain networks and alpha-oscillations: structural and functional foundations of cognitive control // Trends Cogn. Sci. 2016. V. 20 (11). P. 805–817.
21. *Mehta M.R., Lee A.K., Wilson M.A.* Role of experience and oscillations in transforming a rate code into a temporal code // Nature. 2002. V. 417 (6890). P. 741–746.
22. *Rihs T.A., Michel C.M., Thut G.* Mechanisms of selective inhibition in visual spatial attention are indexed by alpha-band EEG synchronization // Eur. J. Neurosci. 2007. V. 25. P. 603–610.
23. *Lakatos P. [et al.].* Global dynamics of selective attention and its lapses in primary auditory cortex // Nature Neurosci. 2016. V. 19 (12). P. 1707–1717.
24. *Panzeri S., Brunel N., Logothetis N.K., Kayser C.* Sensoryneural codes using multiplexed temporal scales // Trends Neurosci. 2010. V. 33. P. 111–120.
25. *Fries P.* A mechanism for cognitive dynamics: neuronal communication through neuronal coherence // Trends Cogn. Sci. 2005. V. 9. P. 474–480.
26. *Basar E.* A review of alpha activity in integrative brain function: fundamental physiology, sensory coding, cognition and pathology // Int. J. Psychophysiol. 2012. V. 86. P. 1–24.
27. *Harmony T.* The functional significance of delta oscillations in cognitive processing // Frontiers in Integrative Neuroscience. 2013. V. 7. P. 1–10.

Динамика вегетативного обеспечения и стрессогенности промежуточного контроля процесса обучения устному переводу

И.С. Парина[1], С.Б. Парин[2]

[1]Нижегородский лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова; email: parinai@yandex.ru
[2]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского; email: parins@mail.ru

Введение

Проблема объективизации показателей энергетического обеспечения когнитивной деятельности приобрела особую актуальность в последние годы, когда начали появляться методы и технологии, позволяющие неинвазивно, в онлайн-режиме и без вмешательства в естественную деятельность человека регистрировать параметры активности вегетативной нервной системы [1]. Одним из таких прогрессивных методов стала созданная в Приволжском исследовательском медицинском университете совместно с Нижегородским государственным университетом им. Н.И. Лобачевского технология событийно-связанной телеметрии сердечного ритма (ССТСР) [2, 3], которая основана на положениях трехкомпонентной теории нейрохимических механизмов стресса [4]. Технология прошла успешную апробацию в условиях различных когнитивных контекстов, в том числе при анализе особенностей вегетативного обеспечения такой стрессогенной и энергозатратной профессиональной деятельности, как синхронный перевод [5–8].

Материал и методы

В данной работе с помощью технологии ССТРС оценивались особенности вегетативного обеспечения и стрессогенности промежуточного контроля (экзамена) процесса обучения устному переводу. В исследовании приняли участие 8 студенток выпускного курса бакалавриата (возраст от 20 до 23 лет), выполнявших задание по переводу с листа двух текстов – с русского языка на немецкий и с немецкого языка на русский – и двустороннему переводу беседы. Перевод с листа осуществлялся с предварительной подготовкой (чтение текстов в течение 5 минут), перевод беседы – без подготовки. Ответы записывались на диктофон. После выполнения заданий проводилось персональное обсуждение допущенных ошибок с квалифицированными экспертами. До и после выполнения профессиональных задач испытуемые заполняли проективный тест на уровень эмоциональной дезадаптации (УЭД) [9]. На протяжении всего эксперимента проводилась ССТРС для оценки динамики параметров вегетативной регуляции при когнитивной нагрузке (рис. 1). У всех 8 испытуемых было проведено 2 среза с интервалом в полгода. Сложность профессиональных заданий была сбалансирована в обоих срезах. Парные сравнения переменных между двумя этапами эксперимента проводили с использованием критерия Вилкоксона.

<table>
<tr><td rowspan="2">УЭД</td><td colspan="3">Профессиональная деятельность</td><td rowspan="2">УЭД</td></tr>
<tr><td>Подготовка перевода текста</td><td>Ответ с записью на диктофон</td><td>Обсуждение качества выполнения задания</td></tr>
<tr><td colspan="5">СОБЫТИЙНО-СВЯЗАННАЯ ТЕЛЕМЕТРИЯ РИТМА СЕРДЦА</td></tr>
</table>

Рис. 1. Дизайн эксперимента по оценке динамики вегетативной регуляции и стрессогенности промежуточного контроля процесса обучения последовательному переводу

Результаты и их обсуждение

Проведенное, по сути – пилотное, исследование, несмотря на относительно малую выборку испытуемых, позволяет констатировать существенные изменения как уровня стрессогенности, так и особенностей вегетативной регуляции после 6 месяцев обучения.

Так, при когортном анализе выяснилось, что количество стресс-эпизодов на протяжении всего экзамена во втором срезе снизилось почти вдвое (с 15 до 8, $p < 0{,}05$). Исходя из данных ССТСР, наиболее выраженной стрессогенностью в обоих испытаниях обладали, естественно, этапы ответа (особенно в связи с записью на диктофон) и обсуждения с экспертами качества выполнения заданий. Характерно, что именно на этих этапах зарегистрировано статистически значимое ($p < 0{,}05$) уменьшение как среднего количества стресс-эпизодов (с 3,25 до 2,125 на этапе ответа и с 1,25 до 0,25 на этапе обсуждения), так и общей продолжительности стрессов (более чем в 2 раза). Но в отличие от объективной регистрации, субъективная самооценка методом УЭД не показала существенных изменений, что в очередной раз подчеркивает низкий уровень корреляции между эксплицитным и имплицитным стрессом.

Анализ расчетных параметров динамики вегетативной регуляции ритма сердца также показал некоторые отличия этих показателей при втором изменении относительно первого. Так, хотя средние показатели LF (низкочастотной области спектра вариабельности RR-интервалов, отражающего симпатический компонент вегетативной регуляции) за весь период испытания во втором срезе незначительно снижались относительно первого (885 мс^2 в первом срезе и 867 мс^2 – во втором), именно на этапах ответа и обсуждения зарегистрировано статистически достоверное ($p < 0{,}05$) увеличение показателей симпатической активации во втором срезе, что может свидетельствовать о более высоком уровне мобилизованности испытуемых во втором испытании.

По показателям парасимпатической активности (HF – высокочастотная область спектра вариабельности RR-интервалов) статистически значимые отличия между эпизодами по двум срезам не были обнаружены, однако средние показатели активности парасимпатической регуляции за весь период испытаний во втором срезе были значимо ($p < 0,05$) выше, чем в первом (277,3 мс^2 в первом срезе и 297,5 мс^2 – во втором). Это позволяет говорить об усилении когнитивной активности испытуемых во время второго испытания.

Уровень адаптационного потенциала (TP – показатель общей мощности спектра вариабельности RR-интервалов) во втором срезе вырос статистически незначимо (с 1952,9 мс^2 в первом срезе до 1973,7 мс^2 – во втором). Однако наиболее внушительным этот рост проявился на этапе обсуждения (с 2780,75 мс^2 в первом срезе до 3943,75 мс^2 – во втором, $p < 0,05$), что свидетельствует о повышении психологической устойчивости испытуемых к моменту второго измерения.

Наконец, индекс вегетативного баланса (LF/HF) на протяжении обоих срезов измерений не претерпевал существенных изменений, что может быть связано со сбалансированными изменениями показателей активности симпатической (LF) и парасимпатической (HF) систем в процессе выполнения заданий. По-видимому, именно сочетание повышения адаптационного потенциала с относительной стабильностью вегетативного баланса привело к существенному снижению показателей стрессогенности заданий во втором срезе.

Заключение

Таким образом, благодаря использованию мобильной неинвазивной технологии событийно-связанной телеметрии ритма сердца удалось проследить динамику объективных показателей активности вегетативной нервной системы на протяжении полугода обучения студентов устному переводу. Выявлено существенное повышение устойчивости испытуемых к стрессогенной когнитивной нагрузке в процессе промежуточного контроля обучения. Полученные результаты пилотного исследования демонстрируют перспективность изучения данной проблемы с помощью современных информационных технологий.

Литература

1. *Полевая С.А., Некрасова М.М., Рунова Е.В., Бахчина А.В., Горбунова Н.А., Брянцева Н.В., Кожевников В.В., Шишалов И.С., Парин С.Б.* Дискретный мониторинг и телеметрия сердечного ритма в процессе интенсивной работы на компьютере для оценки и профилактики утомления и стресса // Медицинский альманах. 2013; (26): 151–155.

2. *Polevaia S.A., Parin S.B., Eremin E.V., Bulanov N.A., Chernova M.A., Parina I.S., Chernigovskaya T.V.* Event-related telemetry (ERT) technology for study of cognitive functions // International Journal of Psychophysiology. 2016; 108: 87.

3. *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.

4. *Parin S.B., Vetyugov V.V., Bakhchina A.V., Polevaya S.A.* The role of the endogenous opioid system in the control of heart rate variability under cognitive loads of various levels // Sovremennye Tehnologii v Medicine. 2014; 6(4): 116–126.

5. *Chernigovskaya T.V., Parin S.B., Parina I.S., Konina A.A., Urikh D.K., Yachmonina Y.O., Chernova M.A., Polevaya S.A.* Simultaneous interpreting and stress: pilot experiment // International Journal of Psychophysiology. 2016; 108: 165.

6. *Polevaia S.A., Parin S.B., Chernigovskaya T.V., Parina I.S.* Dynamic of autonomic mode for acute stress in the experimental modeling of the process of simultaneous nterpretation // International Journal of Psychophysiology. 2018; 131S: 137.

7. *Chernigovskaya T.V., Parina I.S., Alekseeva S.V., Konina A.A., Urich D.K., Mansurova Yu.O., Parin S.B.* Simultaneous interpreting: characteristic of autonomic provision of extreme cognitive loads // Sovremennye Tehnologii v Medicine. 2019; 11(1): 132–140.

8. *Парина И.С., Парин С.Б.* Исследование уровня стресса у начинающих переводчиков-синхронистов в рамках когнитивной парадигмы // Вопросы психолингвистики. 2019; 2(40): 124–134.

9. *Григорьева В.Н., Тхостов А.Ш.* Способ оценки эмоционального состояния человека : патент РФ 2291720; 2007.

Образ-алгоритм как мозговой механизм действия руки предметом и произнесения слова речи

В.Л. Пляшкевич

email: vlp231247@yandex.ru

Сенсомоторные отношения всегда полагались принципиально важным принципом нейрофизиологии [1–3]. Все известные нам живые существа на Земле для освоения жизненного пространства, питания и перемещения используют сенсорные органы и органы, осуществляющие движение, функционирующие как единый сенсорно-двигательный механизм. Определенные наборы движений, предназначенные для выживания живого существа во внешнем мире, есть действие. Движение имеет физиологическую основу. Действие основано на особых характеристиках внешней среды. У человека сенсорно-двигательный способ или принцип освоения физического мира достиг совершенства. В работах [4, 5] сенсомоторный механизм действия руки, с помощью которого человек осваивает внешний мир, назван образом-алгоритмом (сокр. О-А). В образе-алгоритме воплощен сенсорно-двигательный принцип О-А-взаимодействия живого существа с внешним миром. Человек вырабатывает действия руки и формирует образ-алгоритм в соответствии с сенсорно-двигательным принципом, воспринимая одновременно 1) сенсорную (например, зрительную) «картину» выполнения действия руки в поле зрения (ОБРАЗ О-А), 2) проприоцептивные сигналы от мышечно-суставного аппарата, вовлеченного в действие, образующие мышечное «правило» (АЛГОРИТМ О-А) выполнения действия.

О-А, составленный из двух – сенсорного и проприоцептивного – образов восприятия является «идеальным» объектом-носителем действия руки предметом, принадлежащим идеальному миру невидимых объектов мозга – психических образов, это простейший психический образ.

Мир мозга можно представить в виде двух уровней нейрореальности. 1-й уровень нейрореальности представлен нейрофизиологическими механизмами и нейронными сетями. 2-й уровень нейрореальности представлен невидимыми объектами – идеальными психическими образами и механизмами, контролирующими их динамику. О-А – это объект образной природы, который принадлежит 2-му уровню нейрореальности. Единство объектов 1-го уровня нейрореальности обусловлено анатомическим строением мозга. Что касается 2-го уровня нейрореальности, то можно предположить, что целостность мира образов обусловливается особой силой притяжения подобных образов. Эта сила обеспечивает притяжение подобных образов, объединяет их в единый идеальный мир подобно тому, как сила притяжения физических масс образовывает единую Вселенную.

Нашей целью является показать, как в онтогенезе человека с помощью первоначальных объектов 2-го уровня нейрореальности – О-А, в которых запечатлено «чистое» (беспредметное) действие руки ребенка предметом, и О-А произнесения слова речи – происходит формирование системы идеальных объектов 2-го уровня нейрореальности, являющихся основой человека как психической действующей и речевой личности.

Действие – временный феномен: «появилось и исчезло». С определением механизма действия – О-А как объекта, принадлежащего 2-му уровню нейрореальности и сенсорно-двигательного принципа, составляющего основу механизма действия, оно перестает быть «умозрением» и приобретает статус реального мозгового объекта (конструкта) с характерным строением, структурой. Представление об О-А действия как о реальном объекте, который является носителем действия на 2-м уровне нейрореальности и его механизмом, дает возможность исследовать его как объект, систему, а действие руки и речь – как объектно обусловленные явления, феномены.

Можно выделить три типа действий, присущих человеку, основой которых являются О-А: 1) действие руки предметом; 2) выполнение форм локомоции как единичных способов перемещения тела в пространстве. Оба – под контролем зрения; 3) произнесение слова речи как действия голосового аппарата под контролем слуха. В данной работе мы рассмотрим действие руки предметом и действие произнесения слова речи.

В отличие от ДВИЖЕНИЯ, ДЕЙСТВИЕ обусловлено необходимостью выживания и существования человека в физическом мире, оно есть СПОСОБ связи человека с объектами внешнего мира, с социумом.

Предложенная концепция О-А действия и речи (человека) основана на принятии сенсорно-двигательного принципа О-А, который есть развитая форма сенсомоторного отношения «глаз – рука»:

1. Концепция О-А в отношении познания объектов внешнего мира с помощью руки основана на понимании О-А как основного способа вовлечения объектов внешнего мира (предмета, человека) в сферу внутреннего мира субъекта с помощью действия (манипуляции) руки предметом.

2. Концепция О-А в отношении речи человека основана на понимании О-А как способа произнесения (проговаривания) слова речи.

Анализ возможностей О-А, в котором запечатлен сенсорно-двигательный принцип О-А, показал, что с его помощью можно объяснить: 1) как происходит вырабатывание «чистых» действий руки ребенка с предметами; 2) как происходит познание предметов и человека как члена социума; 3) как формируется первичный внутренний мир (образованный О-А), первичный внутренний

абстрактный мир, состоящий из психических образов), показать происхождение образов; 4) объяснить, как происходит практический акт во внешнем мире; 5) как формируется механизм звучащего и графического слова и семантическое содержание слова; 6) показать конструкцию слова речи; 7) объяснить тот факт, что математика работает, потому что основой главных математических действий «сложение», «вычитание», «умножение», «деление» являются выработанные в начале обучения действия руки ученика с предметами «счета» (счетным материалом).

Столь большие возможности О-А объясняются запечатленной в нем сенсорно-двигательной информацией, исходно полученной от объектов косного физического мира в виде образов восприятия.

О-А становится также источником происхождения психических образов. Отъединенный (итерированный) в качестве копии от ОБРАЗА (О-А), новый образ становится (на 2-м уровне нейрореальности) образом первого уровня абстрагирования по отношению к ОБРАЗУ (О-А), в нем запечатлена лишенная проприоцептивной компоненты картина выполненного во внешнем мире действия руки каким-либо реальным предметом. Анализ динамики О-А представляет собой, по сути, описание «жизни» идеальных образов, разной меры абстрагированности от ОБРАЗА (О-А).

Образ-алгоритм действия руки предметом

Первым действием руки человека является действие руки ребенка, когда он впервые протягивает руку к предмету в поле зрения. На этой простейшей модели действия видно, что движение руки происходит под контролем зрения. Следующие, более сложные действия руки происходят по тому же принципу О-А («глаз – рука»).

Если действие выполняется впервые, то для сенсорных сигналов от рецепторов, направленных на объекты внешнего мира, и для сигналов проприоцепторов руки система восприятия формирует две сенсорные матрицы с участием нейронных механизмов. Они становятся носителем «ощущения» действия. Когда ребенок выполняет действие рукой, например перемещает металлический предмет по полу, в сфере ощущений в мозге возникает матрица возбужденных нейронов, в которой запечатлен паттерн сенсорных сигналов зрительной, слуховой, тактильной модальностей. Содержание матриц считывается системой восприятия, преобразовывается (декодируется) в сенсорный и проприоцептивный образы восприятия. В сенсорном образе восприятия (это ОБРАЗ (О-А)) каждая сенсорная модальность субъективно переживается как свет, цвет, звук, запах и т. д. Содержание ОБРАЗА проецируется на особый субъективный внутренний экран, который можно назвать ВНУТРЕННИМ СЕНСОРНЫМ ЭКРАНОМ, на нем субъект воспринимает («видит», «слышит и т. д.) образ. Представление о существовании внутреннего сенсорного экрана оправдано интроспективным наблюдением, на нем субъективно отображаются образы, составленные из объектов сенсорных модальностей, которые человек «видит», «слышит», «обоняет», «тактильно осязает» и т. д.

Сенсорный образ находится в единстве с проприоцептивным образом (темное мышечное чувство, по И.М. Сеченову [1]), который не отображается на внутреннем сенсорном экране. В нем представлено мышечное правило выполнения данного действия (это АЛГОРИТМ (О-А)). Такое единство внешнего образа восприятия – ОБРАЗА, в котором впервые запечатлена манипуляция руки предметом и внутреннего проприоцептивного образа восприятия – АЛГОРИТМА, есть целый двойной образ восприятия, или образ-алгоритм. ОБРАЗ и АЛГОРИТМ пребывают в составе О-А «нераздельно» и «неслиянно», обусловливают друг друга, создают его как целый объект. Каждый временной (Δt) срез О-А обусловлен моментами взаимных влияний ОБРАЗА и АЛГОРИТМА.

О-А представляет собой механизм (код) действия руки предметом, он является объектом, принадлежащим 2-му уровню нейрореальности.

В процессе восприятия системой восприятия действия руки внешний объект (предмет) в виде О-А становится частью внутреннего мира человека. О-А, благодаря неразрывной связи АЛГОРИТМА (О-А), образованного проприоцептивными сигналами, проецирующимися на СХЕМУ ТЕЛА, устанавливает жесткую связь с двигательной системой человека, включающей костно-мышечный каркас тела. Благодаря этому О-А утверждается на 2-м уровне нейрореальности, становится фундаментальным объектом-носителем действия и сохраняется неизменным в течение жизни человека. Множество О-А образует первичный внутренний мир – мир «чистых» действий или способов действия рукой предметами, лишенных образа предмета.

Благодаря образной природе от ОБРАЗА (О-А) отъединяется (итерируется) копия образа, которая становится «чистым» абстрактным образом и получает возможность участвовать в психической жизни субъекта. Множество образов, итерированных от ОБРАЗОВ (О-А), образует первичный внутренний образный мир субъекта. Образы сохраняют неизменными связи с породившими их О-А. Особый характер абстрактной связи придает образу максимальное число степеней свободы, обеспечивает связь с другими образами по принципу подобия. В то же время сохранение неразрывной связи каждого образа с соответствующим ОБРАЗОМ (О-А) и тем самым с двигательной системой придает миру образов огромную устойчивость, обеспечивая психическую стабильность образной сферы субъекта.

Важным является тот факт, что О-А формируется при восприятии системой восприятия СОБСТВЕННОГО действия руки. Поскольку не существует врожденного механизма вырабатывания О-А, ребенок воспринимает действия руки с предметом другого человека как образцовое действие, или манипуляцию-шаблон. В ней система восприятия выделяет отдельные шаги, определяет

базисный тип действия каждого шага, далее она находит подобный, ранее сформированный О-А. Для каждого шага чужого действия система восприятия формирует копию манипуляции-шаблона, или образ-шаблон, составленный из собственных О-А, воспроизводит ее, повторяя чужое действие руки предметом. Так утвержденные в социуме действия руки другого человека (родителей) передаются детям из поколения в поколение.

Базисные действия

О-А – это динамический объект, это действие руки предметом, которое выполняется по правилу одного из восьми базисных действий: «приблизить», «удалить» («отдалить»), «соединить», «разделить», «объединить», «разъединить», «разрушить», «сохранить» (ПРИ, УДА, СОЕ, РАЗ, ОБЪ, РАЗЪ, РАЗР, СОХ) [4, 5]. Все простые и сложные формы практической деятельности человека в социуме с помощью руки состоят из единичных (элементарных) действий, выполненных по какому-либо базисному правилу. Наши попытки обнаружить единичные действия руки предметами, кроме указанных восьми основных действий, оказались безуспешными. Так, действие «вращение» является не самостоятельным действием, а вариантом выполнения действия «приблизить», «удалить» по перемещению предмета между двумя точками по дуговой траектории.

Базисные действия можно полагать «архетипами» всех конкретных действий руки человека предметами. Для базисных действий мы предложили также название кронактов (Crownact). Конкретные действия руки предметами (О-А) в возрасте до двух с половиной лет можно полагать единичными кронактами.

Вырабатывание «чистых» действий руки

Ребенок после рождения до двух с половиной лет вырабатывает «чистые» действия руки предметами. На этом этапе онтогенеза в период вырабатывания действий ребенок еще не способен познавать предметы. Предметы являются для него лишь средством для вырабатывания действий разными предметами, но сами предметы ребенок «не видит». Можно наблюдать, как ребенок берет какой-либо предмет, выполняет некоторое действие, оставляет его и переходит к следующему предмету. Очевидно, что он еще не способен к целенаправленному действию, к сосредоточению внимания на предмете, так как еще не появилась мотивированная потребность познания предметов. М. Монтессори говорит: «Первая задача младенца состоит в том, чтобы подготовить руку к тому, чтобы она стала инструментом, которым можно работать» [6].

В этот период, воспринимая действие, система восприятия видит руку + предмет как единый объект, в котором происходят перемещения и изменения в соответствии с каким-либо базисным действием.

В течение периода вырабатывания «чистых» действий на 1-м этапе в возрасте 3–8 мес. вырабатываются первые простые действия руки предметом (формируются О-А): «приблизить» и «удалить» («отдалить»). Ребенок оперирует целым предметом, перемещая его между двумя точками пространства. Первой точкой отсчета становится тело самого ребенка. Далее, на 2-м этапе в возрасте 8–14 мес. вырабатываются действия (формируются О-А) «соединить» и «разделить», при этом ребенок оперирует составным предметом – «кучкой» (например, кучка яблок, орехов), где каждый предмет может занять любое произвольное место. На 3-м этапе в манипуляции сложносоставным предметом (например, матрешкой, пирамидкой) вырабатываются действия «объединить» и «разъединить», где каждый предмет занимает предназначенное ему место. Одновременно вырабатываются действия «разрушить» и «сохранить».

Наиболее сложные О-А «объединить» и «разъединить» для созданных человеком сложносоставных предметов (например, двигатель самолета) могут включать большое число организованных в блоки более простых О-А предыдущих этапов, образующих «действенную формулу» предмета – его объединения (сборки) или разъединения. Возможно, уровень цивилизации можно определить по сложности действенной формулы, созданного ею наиболее сложного сложносоставного предмета.

Простые действия и познание предметов

К моменту появления в возрасте двух с половиной лет мотивированной потребности, под влиянием которой начинается целенаправленное познание функций предметов, формируется огромное число О-А всех базисных типов. К этому моменту система восприятия уже способна воспринимать предмет в поле зрения как отдельный объект и формировать образ предмета. В это время «чистое» действие руки сцепляется с конкретным предметом, предмет и способ манипулирования предметом становятся единым целым. В целенаправленной манипуляции предметом с помощью «чистого» действия руки (О-А) вырабатывается ПРОСТОЕ ДЕЙСТВИЕ и формируется О-А простого действия. О-А простого действия – это единичный способ манипулирования рукой конкретным предметом по какому-либо базисному правилу, например придвинуть, оттолкнуть, свести, воткнуть и т. д. Сформированные О-А действий и О-А простых действия на 1-м уровне нейрореальности сохраняются в особых местах хранения – модусах действий.

Одновременно с процессом формирования и накопления О-А простых действий с их помощью начинается познание доступных ребенку (человеку) предметов в функциях предметов. Познание функции предмета происходит по принципу О-А при повторении ребенком своей рукой функции руки другого человека. При повторении выполнения чужой функции (например, ребенок видит и повторяет своей рукой, как провести линию карандашом) система восприятия воспринимает выполнение манипуляции СОБСТВЕННОЙ руки. При

этом формируется сенсорно-двигательный О-А ЕДИНОГО ДЕЙСТВИЯ (познанной функции).

В акте познания при восприятии выполнения функции какого-либо предмета другим человеком система восприятия ребенка воспринимает базисное правило действия в каждом единичном шаге функции и находит в модусах действий подобные им, сформированные ранее О-А простых действий. Далее система восприятия составляет из них последовательность О-А простых действий, соответствующую последовательности шагов функции. После этого она в повторяющей манипуляции осуществляет выполнение всех О-А простых действий, образующих последовательность функции с помощью своей руки и корректирует ее по ходу выполнения. В результате успешного повторения функции формируется О-А ЕДИНОГО ДЕЙСТВИЯ, составленный из ОБРАЗА и АЛГОРИТМА, в котором запечатлен механизм познания предмета в какой-то одной конкретной функции.

Часть пространства, на которое распространяется зона действия единичного простого действия, ограничена длиной руки и незначительными перемещениями человека, но с помощью большого числа простых действий может быть познан предмет любой степени сложности, например высотный дом, океан, гора, двигатель самолета.

При познании функции какого-либо предмета (объекта) человеком О-А простых действий становятся аналитическими единицами (элементами), на которые разлагается функция предмета, выполненная другим человеком. Функция, в исполнении другого человека, может наблюдаться ребенком (человеком) или непосредственно перед повторением, или когда-то ранее в течение жизни. Например, молоток познается в активной функции «вбивать гвоздь» при последовательном выполнении: 1) простого действия «удалить» – замах молотком; 2) «приблизить» – приблизить к шляпке гвоздя; 3) «соединить» – ударить по гвоздю. При этом формируется О-А ЕДИНОГО ДЕЙСТВИЯ, составленный из трех О-А простых действий: (О-А УДА) + (О-А ПРИ) + (О-А СОЕ). В нашем примере в одном акте познания в активной функции познается молоток, а гвоздь и доска – в пассивной функции. Так, в актах познания в активных и пассивных функциях познаются все предметы. Минимальная функция включает один О-А простого действия, например взмах руки «удалить», когда бабочка познается в функции (свойстве) «взлететь». Сложные, огромные предметы, например гора (при восхождении), океан (при пересечении на яхте), двигатель самолета, высотное здание и т. д., познаются в их функциях при выполнении огромного числа организованных в блоки О-А простых действий.

О-А, О-А простых действий и О-А единых действий образуют первичный внутренний мир человека.

О-А произнесения слова, комплекс СЛОВО

Произнесение слова человеком есть действие. Формирование О-А произнесения слова происходит, когда система восприятия ребенка (человека) воспринимает (слышит) слово другого человека и ребенок повторяет слово с помощью своего голосового аппарата. В этот момент система восприятия создает образ восприятия собственных звуков СЛОВА и проприоцептивный образ восприятия сигналов от мышц и связок своего голосового аппарата. О-А произнесения слова – это всего лишь механизм ПРОИЗНЕСЕНИЯ (проговаривания) слова, но не механизм целого слова. Покажем на простой модели, как в речевой сфере человека формируется объект-носитель СЛОВА. Предположим, что для ребенка (человека) другим человеком произносится слово «стол» и в качестве обозначаемого показывается предмет стол. Для воспринятых объектов – звуков слова и предмета стола система восприятия создает слуховой и зрительный образы восприятия. В тот момент, когда ребенок (человек) повторяет с помощью своего голосового аппарата звучание «чужого» слова, в его речевой сфере формируется О-А ПРОИЗНЕСЕНИЯ СЛОВА, который сразу сцепляется со зрительным образом восприятия стола. Так в речевой сфере создается новый объект – КОМПЛЕКС «СЛОВО», в составе которого зрительный образ восприятия стола (образ обозначаемого) становится семантическим ядром – носителем семантического содержания звучащего слова «стол», а О-А произнесения слова – механизмом проговаривания слова «стол». По такому общему правилу вырабатываются комплексы СЛОВО для всех слов. В течение жизни в речевом опыте человека образ обозначаемого становится всё более сложным, но принцип формирования О-А произнесения слова остается одним и тем же. Формирование О-А произнесения слова является условием вырабатывания СЛОВА (появления комплекса СЛОВО). В процессе эволюции речи человека сенсорно-двигательный О-А стал основой для привлечения всё более сложного обозначаемого в состав семантического ядра комплекса СЛОВО при вырабатывании слов со всё более сложным семантическим содержанием, определяющим значение слова речи.

При овладении письмом и чтением в состав комплекса СЛОВО входит также О-А написания слова, он становится полным комплексом СЛОВО. Комплекс и полный комплекс СЛОВО представляют слово на 2-м уровне нейрореальности как идеальный, составленный из образов восприятия объект, как объект-носитель звучащего и звучащего + графического СЛОВА. Они образуют объектный базовый лексикон речевой личности.

Литература

1. *Сеченов И.М.* Рефлексы головного мозга. М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1961. 100 с.

2. *Арбиб М.* Метафорический мозг. М. : Мир, 1976. 296 с.

3. *Прибрам К.* Языки мозга. М. : Прогресс, 1975. 464 с.

4. *Пляшкевич В.Л.* Базисные действия человека. РИЦ, 2017. 308 с.

5. *Пляшкевич В.Л.* Когнитивное значение Образа-Алгоритма как механизма действия руки предметом // Труды Шестого Международный форума по когнитивному моделированию (30 сентября – 07 октября 2018). Тель-Авив, 2018. С. 319–325.

6. *Монтессори М.* Впитывающий разум ребёнка. СПб. : Волонтёры, 2009. 320 с.

Цифровое психофизиологическое картирование: поиск маркеров синдрома дефицита внимания с гиперактивностью у детей

С.А. Полевая[1,3], Л.В. Савчук[1,3], А.И. Федотчев[2], К.К. Селиверстова[3], С.Б. Парин[3]

[1]Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород
[2]Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Московская область
[3]Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Синдром дефицита внимания с гиперактивностью (СДВГ) является самой частой причиной нарушений поведения, трудностей обучения, школьной дезадаптации. СДВГ – одно из наиболее распространенных расстройств у детей и подростков. Он встречается примерно у 5 % детей [1, 3, 5, 10], а также у 3–6 % взрослых [6]. СДВГ привлекает интерес в связи с высокой распространенностью и социальной значимостью проблемы. Диагностика СДВГ до сих пор основывается на результатах наблюдения, носит субъективный и ситуативный характер, обладает низкой специфичностью, чувствительностью и надежностью [2, 7, 8]. Актуально развитие цифровых методов картирования психофизиологического статуса и поиск объективных маркеров СДВГ [9].

В нашей работе реализовано цифровое картирование психофизиологического статуса СДВГ на основе интеграции показателей сенсомоторной активности и параметров вегетативной регуляции, связанной с сенсомоторными событиями.

Методы

Для цифровизации психофизиологического статуса применена технология событийно-связанной телеметрии ритма сердца [4]. Тесты сенсомоторной активности (СМА) выполнялись на базе веб-платформы для управляемой активации когнитивных модулей (patform.apway.ru, ПИМУ). Для мониторинга вариабельности ритма сердца и режимов вегетативной регуляции использовался интернет-сервис КОГНИТОМ (cogni-nn.ru, ННГУ им. Н.И. Лобачевского).

У каждого ребенка проведен мониторинг вариабельности ритма сердца (ВРС) при выполнении четырех тестов, задающих разный уровень сложности когнитивной нагрузки.

Тест 1. Стандартная оценка внимания и активности. Компьютерный вариант теста Тулуз-Пьерона.

Тест 2. Уровень сложности 1. Простая сенсомоторная активность. Название шаблона на веб-платформе Apway: ADHD – простая. Описание теста: предлагается фиксировать нажатием на кнопку момент появления на экране предметного изображения. Для активации пространственного внимания введена неоднозначность по пространству. В качестве стимулов используются контурные изображения кошки и мыши. Последовательно предъявляется 20 стимулов с постоянным межстимульным интервалом (2 с) и постоянным временем экспозиции (200 мс) в пяти положениях на мониторе компьютера (центр, верхний и нижний правые и левые углы). Регистрируется время сенсомоторной реакции (СМР), количество ошибок, тип ошибки (пропуск события, лишнее нажатие).

Тест 3. Уровень сложности 2. Сложная сенсомоторная активность. Название шаблона на веб-платформе Apway: ADHD – сложная. Описание теста: предлагается фиксировать нажатием на кнопку момент появления на экране целевого предметного изображения. Для активации пространственного внимания введена неоднозначность по пространству. В качестве стимулов используются контурные изображения кошки и мыши. Целевой стимул – изображение мыши. Последовательно предъявляются 20 стимулов с постоянным межстимульным интервалом (2 с) и постоянным временем экспозиции (200 мс) в пяти положениях на мониторе компьютера (центр, верхний и нижний правые и левые углы). Регистрируется время сенсомоторной реакции, количество ошибок, тип ошибки (пропуск события, нажатие на нецелевой стимул, лишнее нажатие).

Тест 4. Уровень сложности 3. Сложная сенсомоторная активность. Название шаблона на веб-платформе Apway: ADHD – съедобное/несъедобное. Описание теста: предлагается фиксировать нажатием на кнопку момент появления на экране целевого предметного изображения. Целевая функция связана с определением свойств изображаемого объекта. Для активации пространственного внимания введена неоднозначность по пространству. В качестве стимулов используются изображения: рыба, груша, яблоко, крокодил, орел, кот. Целевой стимул – изображения съедобных объектов. Последовательно предъявляются 30 стимулов с постоянным межстимульным интервалом (1,5 с) и постоянным временем экспозиции (300 мс) в пяти положениях на мониторе компьютера (центр, верхний и нижний правые и левые углы). Регистрируется время сенсомоторной реакции, количество ошибок, тип ошибки (пропуск события, нажатие на нецелевой стимул, лишнее нажатие).

Режим вегетативной регуляции, связанный с сенсомоторной активностью, определялся по спектральным показателям ВРС: TP ($мс^2$/Гц) – активность центрального контура управления ритмом сердца и адаптационный потенциал; HF ($мс^2$/Гц) – активность парасимпатической нервной системы; LF ($мс^2$/Гц) – активность симпатической

нервной системы; ИВБ – индекс вегетативного баланса, характеризующий напряжение регуляторных систем.

Статистическая обработка: непараметрические критерии (критерий Манна – Уитни), ANOVA (метод повторных измерений), корреляционный анализ (непараметрический критерий Спирмена).

Результаты

В исследовании приняло участие 33 ребенка в возрасте от 5 до 11 лет: 11 детей с СДВГ и 22 ребенка без диагноза (контроль). Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией (принятой в июне 1964 г. в Хельсинки, Финляндия и пересмотренной в октябре 2000 г. в Эдинбурге, Шотландия). От законного представителя каждого ребенка получено информированное согласие.

Специфические особенности сенсомоторной активности у детей с СДВГ проявляются в увеличении времени СМР в задачах разного уровня сложности по отношению к любым стимулам. При этом продолжительность моторной реакции соответствует возрастной норме, что может свидетельствовать об искажениях в когнитивном модуле функциональной системы, обеспечивающей сенсомоторную активность (рис. 1, 2).

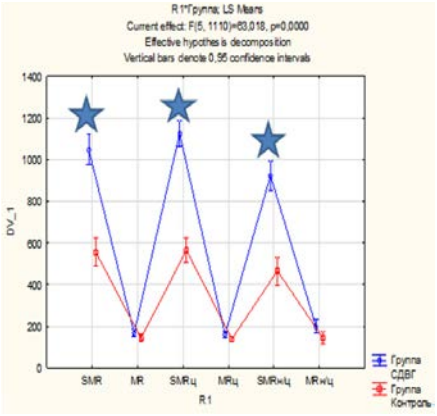


Рис. 1. Время сенсомоторной и моторной реакций (среднее, на целевые и нецелевые стимулы) в группах СДВГ и контрольной для шаблона «ADHD – сложная»

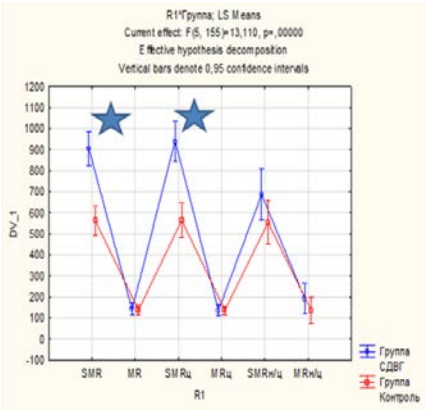


Рис. 2. Время сенсомоторной и моторной реакций (среднее, на целевые и нецелевые стимулы) в группах СДВГ и контрольной для шаблона «ADHD – съедобное/несъедобное»

Особенности психофизиологического статуса при СДВГ проявились в структуре ошибок: при сравнении с контролем больше пропусков целевых стимулов и двойных нажатий на стимулы, что может быть связано с нарушением баланса процессов возбуждения и торможения (рис. 3, 4).

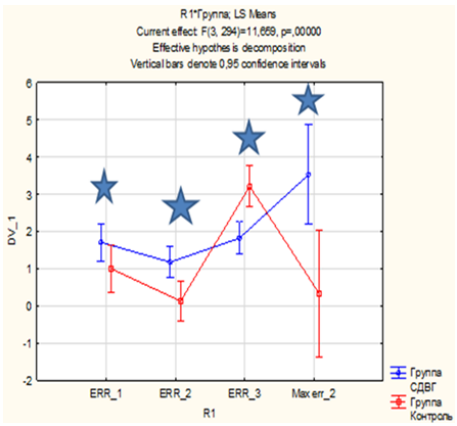


Рис. 3. Количество и характер совершаемых ошибок в группах СДВГ и контрольной для шаблона «ADHD – сложная» (ERR_1 – пропуск целевого стимула; ERR_2 – двойное нажатие; ERR_3 – выбор нецелевого стимула)

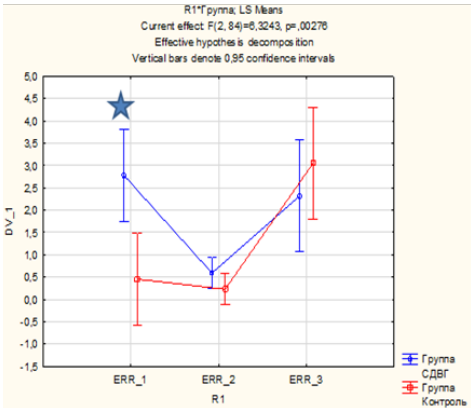


Рис. 4. Количество и характер совершаемых ошибок в группах СДВГ и контрольной для шаблона «ADHD – съедобное/несъедобное» (ERR_1 – пропуск целевого стимула; ERR_2 – двойное нажатие; ERR_3 – выбор нецелевого стимула)

Корреляционный анализ позволил выявить специфические особенности связей между показателями СМА при СДВГ (рис. 5):

– в контекстах без семантической нагрузки (шаблоны «ADHD – простая», «ADHD – сложная») проявляется избыточное количество сильных связей;

– в контексте с семантической нагрузкой (шаблон «ADHD – съедобное/несъедобное») – редукция связей.

Для вегетативного обеспечения СМА у детей с СДВГ характерна редукция центрального контура регуляции ритма сердца, значимое снижение мощности низкочастотных и высокочастотных компонентов спектра ВРС, повышение напряжения регуляторных систем (рис. 6), сокращение количества значимых корреляций между показателями СМА и ВРС.

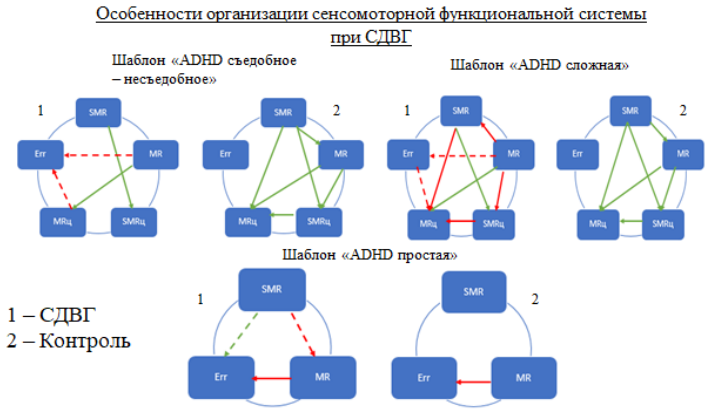
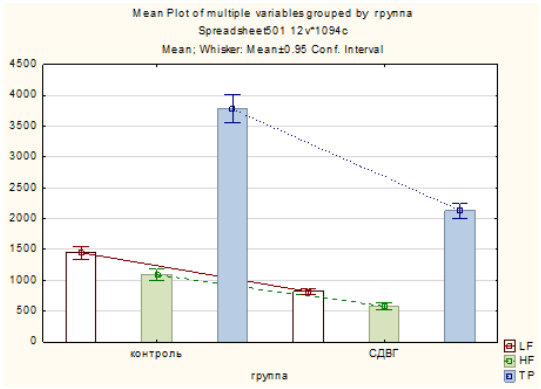


Рис. 5. Характер связей между показателями СМА в группах СДВГ и контрольной для трех шаблонов: «ADHD – простая»; «ADHD – сложная»; «ADHD – съедобное/несъедобное»

А



Б

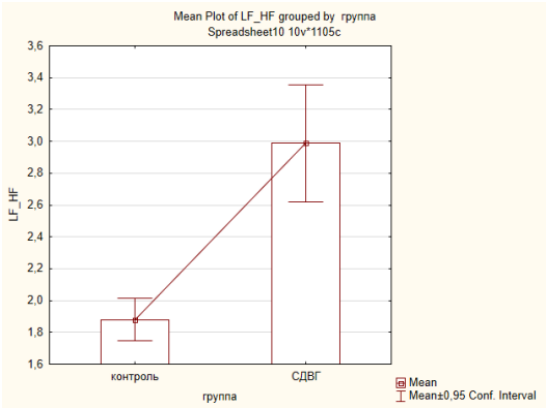


Рис. 6. Особенности вегетативного обеспечения СМА при СДВГ

Заключение

Цифровая карта психофизиологического статуса на основе интеграции показателей сенсомоторной активности и событийно-связанных параметров вегетативной регуляции может стать эффективным инструментом для повышения специфичности, чувствительности и надежность диагностики СДВГ у детей.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 18-013-01225_а, 18-413-520006_р_а, 19-013-00095_а).

Литература

1. *Абшилава Е.Ф., Набойченко Е.С.* Этиология, патогенез и клинические проявления синдрома дефицита внимания и гиперактивности в различные периоды онтогенеза // Педагогическое образование в России. 2016. Вып. 1. С. 183–187.

2. *Заваденко Н.Н., Суворинова Н.Ю.* Результаты фармакотерапии синдрома дефицита внимания и гиперактивности: оценка с применением нейропсихологических методов // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2014. Т. 114, вып. 9. С. 19–24.

3. *Илюхина В.А., Кривощапова М.Н., Манжосова Г.В.* Особенности мозговых механизмов регуляции уровня бодрствования, сформированности познавательных функций и приспособительных реакций у детей с синдромом дефицита внимания и гиперактивности и здоровых сверстников // Физиология человека. 2011. Т. 37, № 2. С. 25–39.

4. *Полевая С.А., Еремин Е.В., Буланов Н.А., Бахчина А.В., Ковальчук А.В., Парин С.Б.* Событийно-связанная телеметрия ритма сердца для персонифицированного дистанционного мониторинга когнитивных функций и стресса в условиях естественной деятельности // Современные технологии в медицине. 2019. Т. 11, вып. 1. С. 150–154.

5. *Федотчев А.И., Земляная А.А., Полевая С.А., Савчук Л.В.* Синдром дефицита внимания с гиперактивностью и современные возможности его лечения методом нейробиоуправления // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2016. Т. 116, вып. 5. С. 98–101.

6. *Чутко Л.С., Сурушкина С.Ю., Яковенко Е.А., Никишена И.С., Анисимова Т.И.* Синдром дефицита внимания у взрослых: клинические, психофизиологические проявления и терапия // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2013. Т. 113, вып. 8. С. 38–41.

7. *Barkley R.A.* Executive functions. What they are, how they work, and why they evolved may. N.Y. : Guilford Publications, 2012. 244 p.

8. *Efron D.* Attention-deficit/hyperactivity disorder: the past 50 years // J. Paediatr. Child Health. 2015. V. 51, № 1. P. 69–73.

9. *Thayer J.F., Ahs F., Fredrikson M., Sollers J.J. 3rd, 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 // Neurosci. Biobehav. Rev. 2012. V. 36, № 2. P. 747–756.

10. *Thomas R., Sanders S., Doust J., Beller E., Glasziou P.* Prevalence of attention-deficit/hyperactivity disorder: a systematic review and meta-analysis // Pediatrics. 2015. V. 135. P. 994–1001.

Цифровое психофизиологическое картирование: особенности сенсомоторной активности при очаговых нарушениях мозгового кровообращения

С.А. Полевая[1], М.М. Циркова[2], Н.А. Тельных[2]

[1]Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород
[2]Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В настоящее время существует множество фактов, которые свидетельствуют, что простая и сложная сенсомоторная активность может быть связана с целым рядом различных анатомических и функциональных источников. В классической нейропсихологии существует арсенал тестовых игр, провоцирующих разнообразные варианты сенсомоторной активности для диагностики локализации и объема нарушений мозгового кровообращения. Достоинством этих методов является активная эмоционально-мотивационная компонента, обеспечивающая вовлечение человека в диагностико-реабилитационные процедуры (тренировки). Важнейшими недостатками является ограниченное пространство признаков для описания структуры индивидуальной когнитивной системы, низкая точность детектирования, существенные искажения оценок, связанные с когнитивно-аффективным статусом эксперта. В рамках принятых клинических стратегий отсутствует возможность для объективного цифрового картирования и контролируемой оптимизации когнитивных функций.

Благодаря развитию компьютерных технологий, технологий виртуальной реальности и программного инструментария открылись уникальные возможности для объективизации диагностики и повышения эффективности коррекции когнитивных функций [1]. Созданы технологические предпосылки для реализации по отношению к когнитивной системе человека базового принципа физических измерений: сравнение подобного с подобным, объекта с эталоном. В качестве эталонов для измерения свойств субъективного когнитивного пространства можно рассматривать информационные объекты и событийные контексты виртуальной компьютерной среды. В таком случае процедура измерения может быть сведена к формализованным оценкам ошибок распознавания, управления или воспроизведения виртуальных эталонов. Результатом измерений станут цифровые когнитивные карты, дающие объективное отображение когнитивной системы конкретного человека в широком диапазоне параметров когнитивного процесса [2–4].

Цель нашей работы состоит в развитии методов цифровизации когнитивных функций и поиск маркеров нарушения мозгового кровообращения по данным психофизиологического тестирования на интернет-платформе.

Методы

Для цифрового картирования когнитивных функций в широком пространстве признаков применены интерактивные сценарии сенсомоторной активности, реализованные на веб-платформе для когнитивных тренировок Apway (platform.apway.ru), разработанной в ПИМУ. К настоящему времени на платформе размещено 350 сценариев, позволяющих проводить измерения отдельных когнитивных модулей в 3 целевых контекстах: сенсомоторная активность по широкому набору визуальных признаков (простая, сложная); поиск объекта; ассоциации разномодальных информационных образов. Каждый тест на когнитивной платформе может быть оптимизирован для актуализации отдельных когнитивных модулей и обеспечивать как построение персональных цифровых когнитивных карт, так и формирование на их основе индивидуальных программ когнитивных тренировок.

Для цифровизации сенсомоторных модулей с учетом семантики информационных образов и уровня сложности поиска решений применены 3 сценария (шаблона):

1) сценарий простой сенсомоторной активности по отношению к стимулам разной семантики: буквы, геометрические фигуры, предметные изображения;

2) сценарий сложной сенсомоторной активности по отношению к тем же стимулам;

3) тест Stroop, обеспечивающий количественную оценку вербально-сенсорных ассоциаций с когнитивным конфликтом.

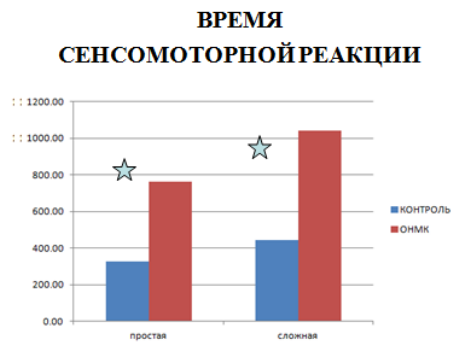
У 15 пациентов неврологической клиники с очаговыми нарушениями мозгового кровообращения и 15 условно здоровых студентов измерены 10 параметров сенсомоторной активности и 8 параметров теста Stroop.

Статистическая обработка: непараметрические критерии (критерий Манна – Уитни), ANOVA (метод повторных измерений), корреляционный анализ (непараметрический критерий Спирмена).

Результаты

Установлено, что при разных уровнях сложности задачи время сенсомоторной реакции и продолжительность моторной реакции у пациентов с нарушениями мозгового кровообращения больше, чем у здоровых (рис. 1). Для всех вариантов семантики время сенсомоторной реакции и продолжительность моторной реакции у пациентов с нарушениями мозгового кровообращения больше, чем у здоровых. В 2 раза чаще проявляется ошибка класса «двойное нажатие» на один стимул.

А



Б

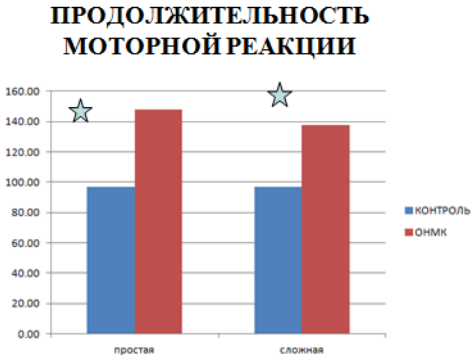


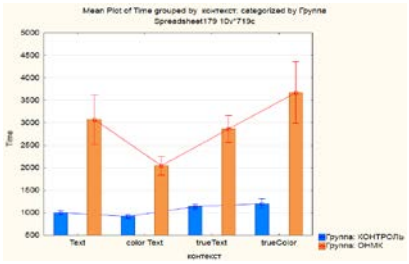
Рис. 1. Особенности сенсомоторной активности при разных уровнях сложности задачи

Во всех контекстах теста Stroop при ОНМК затруднены вербально-сенсорные отношения; при когнитивном конфликте резко снижена активность цветового сенсорного образа (рис. 2).

Заключение

При разных уровнях сложности задачи и для разных вариантов семантики стимулов время сенсомоторной реакции у пациентов с нарушениями мозгового кровообращения больше, чем у здоровых. У пациентов с нарушениями мозгового кровообращения снижена функция когнитивного контроля и затруднены вербально-сенсорные отношения. Показатели сенсомоторной активности в простых и сложных контекстах могут быть использованы в качестве маркеров нарушения мозгового кровообращения.

А



Б

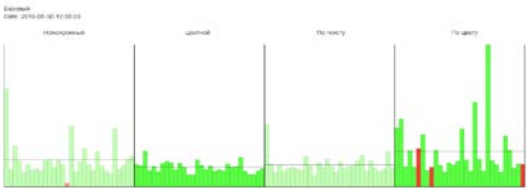


Рис. 2. Особенности функции когнитивного контроля и вербально-сенсорных отношений при очаговых нарушениях мозгового кровообращения

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 18-013-01225_а, 18-413-520006_р_а, 19-013-00095_а).

Литература

1. *Величковский Б.М., Соловьев В.Д.* Компьютеры, мозг, познание. Успехи когнитивных наук. М. : Наука, 2008. 293 с.

2. *Morrison G.E., Simone C.M., Ng N.F., Hardy J.L.* Reliability and validity of the NeuroCognitive Performance Test, a web-based neuropsychological assessment // Frontiers in Psychology, 2015. 6:1652; doi:10.3389/fpsyg.2015.01652.

3. *Hardy J.L., Nelson R.A., Thomason M.E., Sternberg D.A., Katovich K., Farzin F., Scanlon M.* Enhancing cognitive abilities with comprehensive training: A large, online, randomized, active-controlled trial // PLoS ONE. 2015. 10(9): e0134467; doi :10.1371/journal.pone. 0134467.

4. *Jiang T.* Brainnetome: a new-ome to understand the brain and its disorders // Neuroimage, 2013. 80: 263–272.

Анализ механизмов влияния лептина на синаптическую пластичность в гиппокампе

А.Л. Проскура, Т.А. Запара, А.С. Ратушняк

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск; email: annleop@mail.ru

Введение

Гормон лептин (OB) производится клетками белой жировой ткани, адипоцитами, и обладает широким спектром биологических эффектов [1]. Его вклад в регулирование потребления пищи и массы тела хорошо освещен. Растет число исследований, показывающих когнитивно-стимулирующую роль лептина в мозге, связь с нейродегенеративными патологиями, а также с перспективой разработки их терапевтической коррекции [2–5].

Секретируется несколько изоформ рецептора лептина (OB-R, LepR, кодируется геном *Ob-R*), и только полноразмерный вариант, OB-Rb, обладает мотивом взаимодействия с протеинкиназой JAK2, которая обеспечивает запуск ряда сигнальных каскадов [1]. В гиппокампе рецепторы лептина локализуются главным образом в зубчатой извилине и поле CA1 [6].

Прямое введение в мозг лептина способствовало развитию долговременной потенциации и формированию пространственной памяти у мышей [7]. Лептин влияет на кругооборот глутаматных рецепторов в поле CA1 гиппокампа и таким образом участвует в регулировании возбуждающей нейропередачи в мозге [8].

Животные, не чувствительные к лептину или лишенные его рецепторов, демонстрируют нарушения гиппокампальной синаптической пластичности и проблемы при обучении [7, 9]. Резистентность к лептину связывают с индукцией депрессивно-подобного поведения [10]. У пациентов с болезнью Альцгеймера с возрастом наблюдается значительное снижение экспрессии лептина и его рецептора Ob-Rb в неокортексе и гиппокампе [2, 11].

Таким образом, анализ молекулярных механизмов влияния лептина на регулирование синаптической пластичности в поле CA1 гиппокампа является актуальной задачей и поэтому стал темой данного исследования.

Лептин и синаптическая пластичность

Общепринятой клеточной моделью синаптической пластичности *in vitro* является долговременная потенциация (ДВП), проявляющаяся в виде усиления синаптической эффективности на протяжении длительного времени [12]. Считается, что ДВП отражает процессы, которые обеспечивают когнитивные функции мозга, мышление, память.

Ионотропные глутаматные рецепторы реализуют быструю возбуждающую нейропередачу и различаются по их чувствительности к агонистам: N-метил-D-аспарагиновой (НМДА) – НМДА-рецепторы (НМДАР), α-амино-3-гидрокси-5-метил-4-изоксазолпропионовой (АМПА) – АМПА-рецепторы (АМПАР), каинатной и квисквалатной кислот – каинатные рецепторы [13].

В поле CA1 взрослого гиппокампа AMPA-рецепторы представлены тетрамерами димеров субъединиц GluR1, GluR2, GluR3. Считается, что данный тип глутаматных рецепторов вносит основной вклад в изменение и поддержание синаптической эффективности в гиппокампе [14].

Базовая нейротрансмиссия и индукция ДВП зависят от АМПАР с субъединицами GluR2 и GluR3 (GluR2-АМПАР). Экспрессия ДВП сопровождается встраиванием рецепторов с субъединицей GluR1 (GluR1-АМПАР) в зону постсинаптической части синапса [15].

Погружение GluR2-АМПАР после индукции ДВП, вероятно, контролируется классической белковой машиной эндоцитоза, которая закрепляется на фосфоинозитол(4,5)-бифосфатах (ФИ(4,5)Ф2) плазматической мембраны постсинапса через эпсин и обеспечивает формирование везикулы, а также сортировку GluR2-АМПАР [15, 16].

Присоединение лептина к LepR приводит к повышению на плазматический мембране уровня ФИ(3,4,5)Ф. Сам LepR напрямую не влияет на уровень активности фосфоинозито-3-киназы 1 класса (ФИ3К), которая обеспечивает генерацию ФИ(3,4,5) трифосфатов из ФИ(4,5)Ф2. Вероятно, здесь играет роль IRS1 (insulin receptor substrate 1) [1]. Лептин способствует ингибированию фосфатазы PTEN [8], которая является антагонистом ФИ3К (дефосфорилирует трифосфаты до бифосфатов): ФИ(3,4,5)Ф → ФИ(4,5)Ф [17]. Man с соавторами выдвигает предположение, что GluR2-АМПАР формируют комплексы с ФИ3К [18]. ФИ(3,4,5)Ф поддерживают кластеризацию GluR2-АМПАР на синапсах [19].

Подобный механизм, вероятно, лежит в основе ингибирования лептином эпилептиформной активности в поле CA1 гиппокампа – закрепление на синапсах ВК-каналов (потенциал-зависимые, активируемые внутриклеточными ионами кальция калиевые каналы, calcium-activated potassium channel subunit alpha-1 (кодируются геном *Kcnma1*)), которые обеспечивают реполяризацию мембраны [20, 21].

На ФИ(3,4,5)Ф закрепляется регулятор активности малой ГТФазы Rac1 PREX (Phosphatidylinositol 3,4,5-trisphosphate-dependent Rac exchanger 2 protein), для активирования которого также необходимы бета- и гамма-субъединица G-белков [22], которые ассоциированы с метаботропными глутаматными рецепторами (МГР) в гиппокампе [23].

Rac1 запускает ремоделирование актинового цитоскелета в дендритных шипиках после индукции ДВП [24, 25].

Показано, что лептин способствует быстрым и динамичным перестройкам актинового цитоскелета и росту плотности филоподий на гиппокампальных нейронах, причем данные изменения происходили при условии активирования НМДА-рецепторов [26].

Таким образом, лептин способствует поддержанию на синапсах плотности конститутивно рециклирующих GluR2-АМПАР, которые обеспечивают как базовую нейротрансмиссию, так и ее изменение после индукции ДВП, а также способствует снижению возбудимости синаптической мембраны в условиях аберрантной синаптической пластичности (через ВК-каналы) (рис. 1).

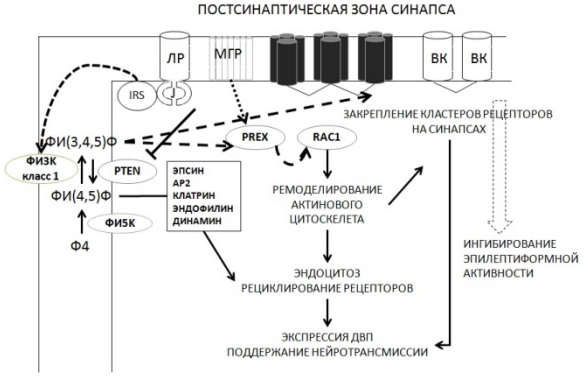


Рис. 1. Схематичное представление вклада рецептора лептина в изменение плотности синаптических рецепторов: ЛР – лептиновый рецептор; ВК – калиевый канал; МГР – метаботропный глутаматный рецептор; Ф4 – фосфоинозитидмонофосфат; ФИ(4,5)Ф – бифосфат; ФИ(3,4,5)Ф – трифосфат; ФИ5К – фосфоинозитид-5-киназа; ФИ3К – фосфоинозитид-3-киназа; PTEN – Phosphatidylinositol 3,4,5-trisphosphate 3-phosphatase and dual-specificity protein phosphatase PTEN; PREX – Phosphatidylinositol 3,4,5-trisphosphate-dependent Rac exchanger 2 protein; Rac1 – Ras-related C3 botulinum toxin substrate 1; IRS1 – Insulin receptor substrate 1; J – janus tyrosine kinase 2; пунктирные стрелки – активация; ⊣ – дезактивирующее воздействие; ▮ – GluR2-АМПАР)

После индукции ДВП в зону синаптического контакта активно вводятся GluR1-АМПАР [14]. Быстрая мобильность данного типа рецепторов обеспечивает первую реакцию постсинапса на пришедший сигнал. Вначале наблюдается массовый ввод GluR1-АМПАР, а затем в течение нескольких минут – снижение и выход на новый уровень плотности рецепторов, что выражается в усилении синаптической эффективности [27]. Известно, что GluR1-АМПАР замещаются на GluR2-АМПАР их конститутивным рециклированием [14, 15, 28].

В гиппокампальных нейронах GluR1-АМПАР солокализуется с белками HIP1 (huntingtin interacting protein) [29]. HIP1 связывается с хантингтином, клатрином, а также вместе с белками HIP1R (huntingtin-interacting protein 1-related protein) участвует в регулировании ремоделирования актинового цитоскелета при эндоцитозе. При этом Gottfried с коллегами в своей работе [30] подчеркивает, что домены ENTH белков HIP1 и HIP1R не связывают ФИ(4,5)Ф2 в отличие от классических белков эндоцитоза эпсина и АР180. Домены ENTH белков HIP1 и HIP1R взаимодействуют с ФИ(3,4)Ф2. Синтез ФИ(3,4)Ф2 из ФИ(4)Ф может осуществлять фосфоинозитид-3 протеинкиназа 2 класса [31]. PTEN также дефосфорилирует ФИ(3,4)Ф2 до ФИ(4)Ф [17].

После индукции ДВП процесс рециклирования GluR1-АМПАР значительно интенсифицируется [28], возвращая не закрепившиеся на синапсах рецепторы [14]. Таким образом, функциональный комплекс эндоцитозных белков может обеспечивать дополнительное введение GluR1-АМПАР (рис. 2).

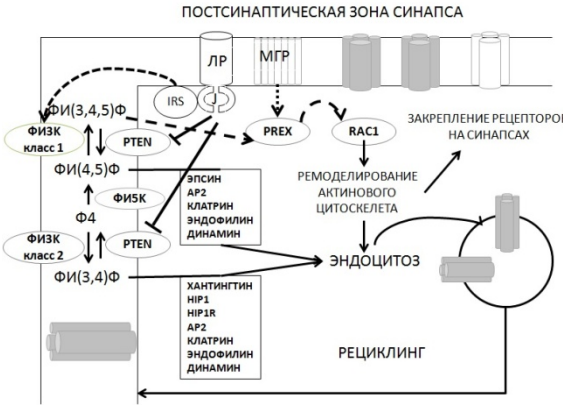


Рис. 2. Схематичное представление вклада рецептора лептина в изменение плотности GluR1-АМПАР: ЛР – лептиновый рецептор; МГР – метаботропный глутаматный рецептор; Ф4 – фосфоинозитидмонофосфат; ФИ(4,5)Ф – бифосфат; ФИ(3,4)Ф – бифосфат; ФИ(3,4,5)Ф – трифосфат; ФИ5К – фосфоинозитид-5-киназа; ФИ3К – фосфоинозитид-3-киназа; PTEN – Phosphatidylinositol 3,4,5-trisphosphate 3-phosphatase and dual-specificity protein phosphatase PTEN; PREX – Phosphatidylinositol 3,4,5-trisphosphate-dependent Rac exchanger 2 protein; Rac1 – Ras-related C3 botulinum toxin substrate 1; IRS1 – Insulin receptor substrate 1; J – janus tyrosine kinase 2; пунктирные стрелки – активация; ⊣ – дезактивирующее воздействие; ▮ – GluR1-АМПАР; ▯ – НМДА рецепторы)

Стоит отметить, что наблюдается изменение циркулирующего уровня лептина в клинических моделях болезни Хантингтона (развивается в результате мутации в гене хантингтина (*Htt*)) [21].

Лептин через непрямое ингибирование PTEN и активирование ФИ3К будет способствовать структурно-функциональным изменениям в течение зависимой от НМДА-рецепторов ДВП на синапсах нейронов поля СА1 гиппокампа (рис. 2).

На постсинаптической части синапсов НМДА-рецепторы формируют ядро синаптического интерактома, отвечающее за прием, определение новизны, обработку, принятие решения и выбор реакции на приходящий на синапс сигнал. То есть по существу, эта многоуровневая молекулярная машина осуществляет базовые функции, лежащие в основе когнитивности [32]. PTEN в данной системе выступает как негативный регулятор повы-

шения плотности АМПА-рецепторов после индукции ДВП: поддерживает пул ФИ(4,5)Ф и Ф(4)Ф, что, с одной стороны, будет способствовать эпсин-зависимому эндоцитозу рецепторов, с другой – ухудшать кластеризацию рецепторов в зоне синаптического контакта. Лептин через ФИ3К-сигналлинг способствует усилению синаптической эффективности и, таким образом, реализации высших когнитивных процессов в мозге.

Имеются данные, что лептин усиливал взрослый нейрогенез в зубчатой извилине через стимулирование пролиферации нейрональных предшественников протеинкиназой Akt, для активности которой необходимы ФИ(3,4,5)Ф [33]. Установлено, что добровольные и необременительные физические нагрузки, а также прием антиоксидантов улучшали пластичность, познавательные способности и пространственную память. При этом также усиливался нейрогенез в зубчатой извилине. Лептин при этом обеспечивал аддитивный эффект физической нагрузки и антиоксидантов на индукцию взрослого нейрогенеза и улучшение когнитивных способностей [5]. Предложенная нами модель молекулярных взаимодействий, запускаемых лептином, упорядочивает разнообразные экспериментальные данные и позволяет понять базис рассматриваемых процессов на клеточном уровне.

Заключение

Лептин модулирует эффективность синаптической передачи в поле СА1 гиппокампа через регулирование в зоне синаптических контактов плотности АМПА-рецепторов. Рассмотренные в данной работе молекулярные события и предложенная модель функциональной сети белок-белковых взаимодействий, запускаемых лептином, описывают, по крайней мере отчасти, клеточные основы реализации когнитивных процессов в гиппокампе.

В работе использованы данные, полученные при выполнении базового проекта фундаментальных исследований РАН IV 35.1.5 и РФФИ № 17-04-01440-а.

Литература

1. *Frühbeck G.* Intracellular signalling pathways activated by leptin // Biochem. J. 2006. V. 393. P. 7–20.

2. *Irving A.J., Harvey J.* Leptin regulation of hippocampal synaptic function in health and disease // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci. 2013. V. 369. Art. 20130155.

3. *Malekizadeh Y. [et al.]*. A leptin fragment mirrors the cognitive enhancing and neuroprotective actions of leptin // Cereb. Cortex. 2017. V. 27. P. 4769–4782.

4. *McGregor G., Harvey J.* Food for thought : leptin regulation of hippocampal function and its role in Alzheimer's disease // Neuropharmacology. 2018. V. 136. P. 298–306.

5. *Yook J.S. [et al.]*. Leptin in hippocampus mediates benefits of mild exercise by an antioxidant on neurogenesis and memory // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2019. V. 116. P. 10988–10993.

6. *Huang X.F. [et al.]*. Localization of leptin receptor mRNA expression in mouse brain // Neuroreport. 1996. V. 7. P. 2635–2638.

7. *Harvey J., Solovyova N., Irving A.* Leptin and its role in hippocampal synaptic plasticity // Prog. Lipid. Res. 2006. V. 45. P. 369–378.

8. *Moult P.R. [et al.]*. Leptin regulates AMPA receptor trafficking via PTEN inhibition // J. Neurosci. 2010. V. 30. P. 4088–4101.

9. *Oomura Y. [et al.]*. Leptin facilitates learning and memory performance and enhances hippocampal CA1 long-term potentiation and CaMK II phosphorylation in rats // Peptides. 2006. V. 27. P. 2738–2749.

10. *Van Doorn C. [et al.]*. Leptin resistance and hippocampal behavioral deficits // Physiol. Behav. 2017. V. 176. P. 207–213.

11. *King A. [et al.]*. Disruption of leptin signalling in a mouse model of Alzheimer's disease // Metab. Brain. Dis. 2018. V. 33. P. 1097–1110.

12. *Bliss T.V., Collingridge G.L.* A synaptic model of memory: long-term potentiation in the hippocampus // Nature. 1993. V. 361. P. 31–39.

13. *Bochet P., Rossier J.* Molecular biology of excitatory amino acid receptors: subtypes and subunits // EXS. 1993. V. 63. P. 224–233.

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

15. *Petrini E.M. [et al.]*. Endocytic trafficking and recycling maintain a pool of mobile surface AMPA receptors required for synaptic potentiation // Neuron. 2009. V. 63. P. 92–105.

16. *Kastning K. [et al.]*. Molecular determinants for the interaction between AMPA receptors and the clathrin adaptor complex AP-2 // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2007. V. 104. P. 2991–2996.

17. *Malek M. [et al.]*. PTEN regulates PI(3,4)P2 signaling downstream of class I PI3K // Mol. Cell. 2017. V. 68. P. 566–580.

18. *Man H.Y. [et al.]*. Activation of PI3-kinase is required for AMPA receptor insertion during LTP of mEPSCs in cultured hippocampal neurons // Neuron. 2003. V. 38. P. 611–624.

19. *Arendt K.L. [et al.]*. PIP3 controls synaptic function by maintaining AMPA receptor clustering at the postsynaptic membrane // Nat. Neurosci. 2010. V. 13. P. 36–44.

20. *O'Malley D., Irving A.J., Harvey J.* Leptin-induced dynamic alterations in the actin cytoskeleton mediate the activation and synaptic clustering of BK channels // FASEB J. 2005. V. 19. P. 1917–1919.

21. *Shanley L.J. [et al.]*. Leptin inhibits epileptiform-like activity in rat hippocampal neurones via PI 3-kinase-driven activation of BK channels // J. Physiol. 2002. V. 545. P. 933–944.

22. *Donald S. [et al.]*. P-Rex2, a new guanine-nucleotide exchange factor for Rac // FEBS Lett. 2004. V. 572. P. 172–176.

23. *Berkeley J.L., Levey A.I.* Cell-specific extracellular signal-regulated kinase activation by multiple G protein-coupled receptor families in hippocampus // Mol. Pharmacol. 2003. V. 63. P. 128–135.

24. *Проскура А.Л. [и др.]*. Межмолекулярные взаимодействия в функциональных системах нейрона // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2013. Т. 17. С. 620–628.

25. *Kasai H. [et al.]*. Structural dynamics of dendritic spines in memory and cognition // Trends. Neurosci. 2010. V. 33. P. 121–129.

26. *O'Malley D. [et al.]*. Leptin promotes rapid dynamic changes in hippocampal dendritic morphology // Mol. Cell. Neurosci. 2007. V. 35. P. 559–572.

27. *Zapara T.A. [et al.]*. The mobility of AMPA-type glutamate receptors as a key factor in the expression and maintenance of synaptic potentiation // Neurosci. Beh. Physiol. 2017. V. 47, iss. 5. P. 528–533.

28. *Tanaka H., Hirano T.* Visualization of subunit-specific delivery of glutamate receptors to postsynaptic membrane during hippocampal long-term potentiation // Cell Rep. 2012. № 1. P. 291–298.

29. *Metzler M. [et al.]*. Disruption of the endocytic protein HIP1 results in neurological deficits and decreased AMPA receptor trafficking // EMBO J. 2003. V. 22. P. 3254–3266.

30. *Gottfried I., Ehrlich M., Ashery U.* The Sla2p/HIP1/HIP1R family: similar structure, similar function in endocytosis? // Biochem. Soc. Trans. 2010. V. 38. P. 187–191.

31. *Hawkins P.T., Stephens L.R.* Emerging evidence of signalling roles for PI(3,4)P2 in Class I and II PI3K-regulated pathways // Biochem. Soc. Trans. 2016. V. 44. P. 307–314.

32. *Проскура А.Л. [и др.]*. Синапс как многокомпонентная и многоуровневая когнитивная система // «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2017 : труды V Всерос. конференции. Нижний Новгород, 2017. С. 179–182.

33. *Garza J.C. [et al.]*. Leptin increases adult hippocampal neurogenesis in vivo and in vitro // J. Biol. Chem. 2008. V. 283. P. 18238–18247.

Физические принципы функционирования биологических молекулярных информационных машин

А.С. Ратушняк[1], Т.А. Запара[1], А.Л. Проскура[1], Е.Д. Сорокоумов[1,2]

[1]Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск; email: ratushniak.alex@gmail.com
[2]Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск

Введение

Главная задача, жизненно важная для решения проблем в области искусственного интеллекта, проектирования новых поколений информационных систем и коррекции нейроиндуцированных патологий, – это необходимость понимания физических принципов, лежащих в основе деятельности мозга, базовых механизмов когнитивности. Как теоретический, так и экспериментальный анализ систем такой сложности далеко выходит за пределы возможностей имитационного моделирования и инструментального исследования. Поэтому методологией таких работ может быть анализ возможных истоков их возникновения, базовых принципов, путей эволюции и, главное, функциональной роли их свойств. Необходимо сформировать новую парадигму, основанную на понимании физической сущности и эволюционных корней формирования основных свойств мозга. Такая парадигма, вероятно, должна быть основана на физических принципах, по которым отличаются живые и технические системы. В отличие от распространенной «генетической» концепции, постулирующей в качестве базового различия наличие свойства саморепликации, можно предположить, что главным отличием является возможность понижать внутреннюю энтропию системы, поддерживать гомеостаз. Только такое свойство может обеспечить устойчивость биосистем, давая возможность более длительного существования в энтропийной среде. В этом случае можно предположить возможность спонтанного формирования предельно простых молекулярных комплексов без сложных систем авторепликации. Системы самовоспроизводства, вероятно, возникли значительно позже в результате эволюционного отбора из молекул, обладающих автокаталитическими свойствами.

Необходимые предпосылки возникновения и существования биоинформационных систем

Понятно, что вероятность спонтанного формирования достаточно сложных систем предельно низка. При анализе возможных этапов их возникновения важно исходить из понимания не бинарности, а постепенной, градуальной наращиваемости их свойств – вплоть до когнитивности, самосознания и др. Однако спонтанно возникающие системы из небольшого количества молекул под действием факторов внешней среды должны с той же вероятностью деградировать. Единственный способ для таких молекулярных систем (протобионтов) повысить вероятность своего более длительного существования – приобретение свойства прогнозирования неблагоприятных (увеличивающих энтропию) воздействий среды и благоприятных условий (позволяя накапливать негэнтропию и энергию). Вероятно, это возможно на основе процессов «супрамолекулярного обучения» [1, 2]. Для реализации прогностической функции необходимо присутствие в молекулярном комплексе нескольких молекул, взаимодействующих с факторами внешней среды («рецепторов» и «эффекторов»). Свойство «прогнозирования» может возникнуть, в случае если произойдет ассоциативная фиксация сочетания взаимодействия молекул, изменяющих конформацию при сочетании нейтрального и неблагоприятного (благоприятного) фактора во внешней среде. Если при этом нейтральный фактор предшествует неблагоприятному, вызывающему эффекторную реакцию, позволяющую минимизировать потери энергии системой. В этом случае следующее взаимодействие молекулы рецептора нейтрального фактора приведет к эффекторной реакции, ведущей к уменьшению потерь. А в случае если второй значащий фактор является благоприятным (уменьшающим энтропию), то такая ассоциативная (опережающая) реакция системы будет приводить к накоплению энергии и информации. При этом ранее нейтральный сигнал становится сигнальным. В этом случае затраты энергии на запоминание информации значительно ниже, чем ее приобретение при благоприятном или уменьшение затрат при неблагоприятном внешнем воздействии. При слиянии двух протобионтов количество воспринимаемой ими информации расширяется, увеличивая прогностическую базу и эффективность прогноза. Суммируется и накопленная ими энергия. Все это увеличивает возможность такой молекулярной системы заранее опознать больший спектр неблагоприятных и благоприятных факторов и отреагировать на них. При наличии отбора таких систем средой количество более устойчивых должно увеличиваться. Все это позволяет таким системам в соответствии с принципом негэнтропии увеличивать внутренний порядок с использованием информации и энергии, полученных из внешней среды [3–6].

Подходы и методы моделирования биосистем и их реинжиниринга

В настоящее время возможность проектирования и создания информационных систем, соизмеримых по возможностям с функциями мозга, связывается в основном с нейронными сетями и ме-

тодами их глубокого обучения. При этом не учитывается, что подобность биологических и существующих технических систем больше метафорическая, чем концептуальная. Значительные успехи в области технических нейронных систем, достигнутые в последние несколько лет, базируются в основном на успехах технологии и разработках в области вычислительной техники. Однако экстенсивный рост ресурсов этой техники практически достиг предела из-за физических ограничений. Рост тактовой частоты выше 4–5 ГГц приводит к квадратичному росту тепловыделения, а уменьшение размера элемента – к уменьшению надежности.

В связи с этим совершенствуются подходы к анализу принципов и материальных носителей, составляющих основу биологических молекулярных информационных систем. Формируются новые концепции, основанные на понимании, что основная элементная база БИС, возникшая несколько миллиардов лет назад, наследуется от эволюционных предшественников, а именно от простых молекулярных систем [7, 8].

Главной особенностью таких базовых модулей должен быть анализ нескольких внешних сигналов, запоминание благоприятных (увеличивающих количество энергии и информации, полученных этой системой) и неблагоприятных (уменьшающих энергетику и негэнтропию). В зависимости от определенной значимости сигналов должно осуществляться включение эффекторов, позволяющих либо увеличивать количество благоприятных взаимодействий со средой, либо уменьшать количество неблагоприятных.

Таким образом, можно предположить, что простейшие биологические информационные системы (БИС) по существу являются логическими устройствами, обладающими прогностической функцией на базе информации, полученной при взаимодействии с окружающей средой. Условно схему логических операций, выполняемых такой системой, можно представить следующим образом (рис. 1).

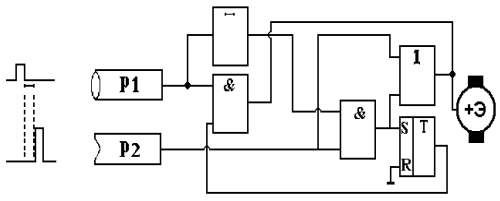


Рис. 1. Схема логических операций, выполняемых элементарной молекулярной негэнтропийной прогностической БИС: Р1 и Р2 – рецепторы внешних сигналов; З – элемент задержки сигнала; & – элемент, выполняющий логическую операцию «И»; 1 – элемент, выполняющий логическую операцию «ИЛИ»; Т – элемент памяти – триггер; +Э – эффектор «положительного сигнала»

При действии сигнала на рецептор **Р1** сигнал с него поступает на элемент, выполняющий логическую операцию **И**, и линию задержки. На выход элемента **И1** сигнал не поступает. С линии задержки сигнал поступает на элемент **И2**. Выходной сигнал на **+Э** не поступает. При наступлении сигнального события, возбуждающего рецептор **Р2**, сигнал распространяется на элемент **И2** и при совпадении с задержанным сигналом с **Р1** поступает на элементы **ИЛИ** и **Т** (триггер). С элемента **ИЛИ** сигнал включает эффектор **+Э.** При этом блок молекулярной машины совершает действие, определяемое функцией эффектора. После первой комбинации сигналов, пришедших на рецепторы **Р1** и **Р2**, кроме эффектора, срабатывает триггер **Т**, переходя во второе устойчивое состояние, обеспечивающее постоянное присутствие сигнала на втором входе логического элемента **И1**. При возникновении второго сигнала на **Р1** сразу возникнет сигнал на **+Э** и произойдет соответствующая функциональная реакция. То есть если комбинация сигналов состоит из светового (на **Р1**) и звукового, ударного (на **Р2**), а функция **+Э** будет состоять в перемещении всего устройства в направлении укрытия от фактора детектируемого **Р2**, то после первой комбинации сигналов вторая их комбинация позволит избежать воздействия фактора **Р2**.

На этапе возникновения негэнтропийных систем функции логических элементов, вероятно, выполняли достаточно простые молекулы. Это способствовало возможности спонтанного возникновения подобных конструкций. Слияние подобных комплексов, различающихся набором рецепторов и эффекторов, способствовало расширению возможностей избегания повреждений и приобретению дополнительной информации и энергии. Например, может быть присоединен блок с рецепторами освещенности, колебаний давления и эффектором, перемещающим систему в направлении пониженной освещенности. Если такая комбинация сигналов произошла в результате перемещения вблизи данной молекулярной системы подобной молекулярной конструкции, то может произойти их слияние (взаимопоглощение). При этом вновь образовавшийся молекулярный комплекс получит дополнительные возможности рецепции внешних факторов и реагирования на них. То есть в результате этого процесса и отбора на основе обратных связей с внешней средой повысится устойчивость такой системы.

Изложенная гипотетическая схема формирования молекулярных комплексов, обладающих негэнтропийными свойствами, естественно, требует экспериментальных доказательств. Представляется малопродуктивным поиск таких конструкций в существующей среде, наполненной биологическими системами, способными к их быстрому поглощению. Хотя, возможно, такое поглощение может являться одним из факторов эволюционного процесса на молекулярном уровне. Попытки конструирования таких систем тоже не привели пока к существенно значимым результатам. Возможным вариантом решения проблемы поиска таких конструкций является нахождение подобных систем в существующих сейчас клетках как молекулярных ансамблях, собранных в процессе эволюции из простых молекулярных комплексов. Наибольший интерес в этой задаче пред-

ставляет анализ молекулярных конструкций в нервных клетках, специализированных именно на решении информационных задач. Биоинформационный анализ молекулярного интерактома нейронов позволяет надеяться на приближение к решению этой проблемы.

Заключение

Таким образом, основываясь на физических принципах возникновения и существования негэнтропийных молекулярных комплексов, можно, используя их математические и/или физические модели и воспроизводя в какой-то мере их эволюцию, создать системы подобные БИС. При этом такие системы, вероятно, будут обладать базовыми функциональными свойствами живых систем, т. е. способностью поддерживать негэнтропийные процессы. Подобные устройства прослеживаются во внутриклеточных молекулярных информационных сетях. Объединение таких функциональных молекулярных блоков в иерархическую систему в живой клетке пока до конца не исследовано. Поэтому анализ внутриклеточных систем как высокоэффективной молекулярной информационной сети чрезвычайно актуален.

Построение модели таких сетей и конструирование из функциональных блоков (элементной базы) систем более высокого уровня «клеток», «многоклеточных систем» или классической «нейронной сети», элементы которой наделены подобным функционалом, позволит строить поколение информационных систем на новом концептуальном уровне. Можно надеяться, что такое конструирование с опорой на знание эволюционных законов и обучение их в условиях обратных связей со средой будет приближать их свойства к биологическим прототипам. Вероятно, такие комплексы будут обладать элементами когнитивности и искусственного интеллекта.

В работе использованы материалы, полученные при выполнении базового проекта фундаментальных исследований РАН IV.35.1.5, грантов РФФИ № 15-29-04875-офи_м и 17-04-01440-а.

Литература

1. *Lehn J.-M.* Supramolecular chemistry: concepts and perspectives. Morrisville : Wiley-VCH, 1995.

2. *Hirst A.R., Escuder B., Miravet J.F., Smith D.K.* High-tech applications of self assembling supramolecular nanostructures gel phase materials: from regenerative medicine to electronic devices // Angewandte Chemie Int. Edition 47. 2008. URL: https://doi.org/10.1002/anie.200800022.

3. *Brillouin L.* Scientific uncertainty, and information. Academic Press, 1964. 178 p.

4. *Лийв Э.Х.* Инфодинамика. Обобщённая энтропия и негэнтропия. Таллинн, 1998. 200 с.

5. *Red'ko V.G.* Epistemological foundations of investigation of cognitive evolution // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2016. Vol. 18. P. 105–115.

6. *Витяев Е.Е.* Целенаправленность как принцип работы мозга // ВЖГиС. 2014. Т. 18, № 4/3. С. 1172–1183.

7. *Tsitolovsky L.* Consciousness, endogenous generation of goals and homeostasis // International Journal of General Systems. 2015. Vol. 44, № 6. P. 655–666. URL: http://dx.doi.org/10.1080/03081079.2015.1032527.

8. *Ratushnyak A.S., Sorokoumov E.D., Zapara T.A.* Evolutionary origins and principles of the organization of biological information systems // Advances in neural computation, machine learning, and cognitive research / Kryzhanovsky B., Dunin-Barkowski W., Redko V. (eds).. Cham : Springer, 2018. P. 339–342. (Studies in Computational Intelligence ; vol. 799) ; doi: 10.1007/978-3-030-01328-8_42.

Показатели динамики сердечного ритма и оценка эмоционально окрашенных изображений

Т.Ю. Савицкая[1], Ю.И. Александров[1,2]

[1]Институт психологии РАН, Москва
[2]Московский государственный психолого-педагогический университет
email: 032646@mail.ru

Изучение организации процессов, характеризующихся эмоциональностью, показателем протекания которых является регистрируемая физиологическая активность, привлекают значительное внимание исследователей [5].

Традиционно подход к изучению эмоций осуществляется через противопоставление их когнитивным процессам, изучению влияния одних на другие, а также поиску физиологических основ изучаемых явлений, что подразумевает дизъюнктивный подход к рассматриваемым вопросам [1].

Вместе с тем сущностной чертой отечественной психологии являются идеи о единстве эмоций и когнитивных процессов (см. в [1]). Развитие теории функциональных систем в системно-эволюционном подходе [3] привело к созданию единой концепции сознания и эмоций [1]. В данной концепции эмоции определяются как характеристика низкодифференцированных функциональных систем, сформированных на ранних этапах онтогенеза.

Ранее было показано, что актуализация функциональных систем разного возраста формирования отражается в показателях динамики сердечного ритма, а также что актуализация систем менее дифференцированных связана с меньшей энтропией сердечного ритма, чем более дифференцированных систем, формирующихся на сравнительно более поздних этапах индивидуального развития [2]. Мы предполагали, что в ситуации рассматривания изображений, связанной с появлением выраженных эмоций у участника эксперимента, будут выявляться такие параметры сердечного ритма, которые характеризуют актуализацию сравнительно низкодифференцированных систем. Цель данного исследования заключалась в проверке высказанного предположения.

В исследовании участникам предлагалось описать 24 изображения различной эмоциональной валентности (негативные, позитивные, а также нейтральные) из базы NAPS [6]. После того, как изображение находилось на экране в течение минуты, под ним по очереди появлялись шкалы – сначала для оценки валентности эмоционального отношения к изображению, затем для оценки интенсивности этого отношения. Длительность ответа не ограничивалась.

Участники оценивали фотоизображения с помощью 9-балльных шкал самооценки с использованием графических рисунков Self-Assessment-Manikin [4]. Шкала эмоциональной валентности была биполярной, где оценке 1 соответствовало негативное, 5 – нейтральное, 9 – позитивное эмоциональное отношение к изображению. Шкала интенсивности представляла собой оценки от 1 (низкая интенсивность) до 9 (высокая интенсивность). Для анализа динамики сердечного ритма использовался показатель выборочной энтропии (SampEn) [7].

Регистрация сердечного ритма осуществлялась посредством прибора HxM BT (Zephyr Technology), расчет проводился в программе HeartAlgo-Analyzer (А.В. Демидовский).

В исследовании приняли участие 30 человек (11 мужчин, 19 женщин) в возрасте от 18 до 32 лет (M = 21, SD = 4,705, Med = 18,5).

С учетом различий между индивидуальными оценками в отношении изображений, определяемых в NAPS как негативные, позитивные и нейтральные, все участники были разделены на 4 группы, причем первая и вторая группа основаны на сопоставлении оценок негативных и нейтральных изображений, в третьей и четвертой группе сопоставлялись оценки нейтральных и позитивных изображений. Данные по каждому участнику представлены дважды, как в первой, так и во второй паре групп.

Первая группа состояла из 14 человек – тех, кто негативные изображения оценил по валентности в диапазоне 1–3,5 балла, а по интенсивности – от 6 до 9 и у кого наблюдались достоверные различия в оценках по «валентности» или «интенсивности» между негативными и нейтральными изображениями (критерий Вилкоксона, $p < 0{,}05$).

Вторая группа включала в себя 16 человек, у которых не было обнаружено значимых различий между оценками негативных и нейтральных изображений (критерий Вилкоксона, $p < 0{,}05$).

Третья группа включала 7 человек – тех, у кого были выявлены значимые различия в оценках между позитивными и нейтральными изображениями (критерий Вилкоксона, $p < 0{,}05$) и оценки соответствовали показателям валентности от 6,5 до 9, а интенсивности 6–9.

Четвертая группа из 23 человек, у которых не обнаружено различий в оценках нейтральных и позитивных изображений (критерий Вилкоксона, $p > 0{,}05$).

Во всех группах распределение значений SampEn было нормальным (тест Колмогорова – Смирнова, $p < 0{,}05$).

Анализ выборочной энтропии сердечного ритма (SampEn) показал:

в первой группе значения SampEn были ниже (критерий Стьюдента для зависимых выборок $t(14) = -2{,}212$; $p = 0{,}046$) при негативных оценках

(M = 0,67; SD = 0,054), чем при нейтральных (M = = 0,7; SD = 0,046);

во второй группе не выявлено значимых различий в значениях показателя SampEn при оценке негативных (M = 0,71; SD = 0,06) и нейтральных (M = 0,68; SD = 0,05) изображений (критерий Стьюдента для зависимых выборок $t(16) = 1,870$; $p = 0,081$);

в третьей группе значения SampEn при описании позитивных (M = 0,7; SD = 0,04) и нейтральных (M = 0,71; SD = 0,02) изображений значимо не различались (критерий Стьюдента для зависимых выборок $t(7) = 0,71$; $p = 0,02$);

в четвертой группе значения SampEn при описании позитивных (M = 0,68; SD = 0,05) и нейтральных (M = 0,69; SD = 0,05) изображений значимо не различались (критерий Стьюдента для зависимых выборок $t(23) = 1,141$; $p = 0,266$).

Таким образом, субъективная оценка негативных изображений как более эмоциональных находит свое отражение в снижении энтропии сердечного ритма, что, как мы считаем, подтверждает наше предположение и говорит о снижении дифференцированности актуализированных систем, обеспечивающих взаимодействие индивида со средой. При сопоставлении оценок группы позитивных изображений как более эмоциональных, чем нейтральные, значимых различий в энтропии сердечного ритма не было обнаружено. Обсуждаются причины разной выраженности физиологической активности при позитивных и негативных эмоциях.

Отсутствие изменений в показателе динамики сердечного ритма в группах, где оценки значимо не различались при сопоставлении негативных и нейтральных изображений, а также в группе, где сопоставлялись нейтральные и позитивные изображения, может говорить о том, что просмотр изображения сам по себе не связан с теми изменениями показателя дифференцированности актуализированного опыта, который соответствует эмоциям. Такой показатель связан именно с субъективным отношением к изображению как к эмоциональному событию.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-313-20003 мол_а_вед.

Литература

1. *Александров Ю.И.* От эмоций к сознанию // Психология творчества: школа Я.А. Пономарева / под ред. Д.В. Ушакова. М., 2006. С. 293–328.

2. *Бахчина А.В., Александров Ю.И.* Сложность сердечного ритма при временной системной дедифференциации // Экспериментальная психология. 2017. Т. 10, № 2. С. 114–130.

3. *Швырков В.Б.* Введение в объективную психологию / под ред. Ю.И. Александрова. М. : Ин-т психологии РАН, 2006. 592 с.

4. *Bradley M.M., Lang P.J.* Measuring emotion: the Self-Assessment Manikin and the semantic differential // Journal of Behavior Therapy & Experimental Psychiatry. 1994. Vol. 25. P. 49–59.

5. *Dalgleish T.* The emotional brain. Nature reviews // Neuroscience. 2004. Vol. 5. P. 582–589.

6. *Marchewka A., Żurawski Ł., Jednoróg K., Grabowska A.* The Nencki Affective Picture System (NAPS): introduction to a novel, standardized, wide-range, high-quality, realistic picture database // Behavior Research Methods. 2014. Vol. 46 (2). P. 596–610.

7. *Richman J.S., Moorman J.R.* Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy // American Journal of Physiology. Heart and Circulatory Physiology. 2000. Vol. 278 (6). P. H2039–2049.

Нарушения нейросетевой ритмической активности: таламокортикальная дизритмия

Е.Ю. Ситникова

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва; email: eu.sitnikova@gmail.com

Кора больших полушарий головного мозга – неокортекс – наиболее позднее эволюционное приобретение млекопитающих и человека, формирование которого происходило по мере совершенствования функций восприятия, развития познавательных способностей и высших психических функций. Практически вся информация от органов чувств, за исключением обоняния, поступает к высшим сенсорным отделам в неокортексе, проходя через отдел промежуточного мозга – таламус. Увеличение размеров неокортекса в процессе эволюции происходило пропорционально увеличению размеров таламуса (рис. 1).

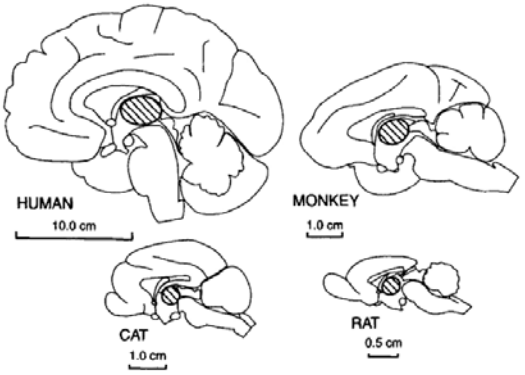


Рис. 1. Относительные размеры таламуса (заштриховано) и неокортекса у разных видов млекопитающих и человека [1]

Таламус – это сложный конгломерат анатомически и функционально обособленных ядер, среди которых выделяют 3 группы: 1) специфические переключательные «релейные» ядра, которые передают информацию от органов чувств (т. е. афферентный поток, сенсорная группа ядер) либо команды, запускающие и контролирующие движения (эфферентный поток, моторная группа ядер); 2) ассоциативные ядра, которые получают информацию из неокортекса; 3) неспецифические ядра, которые формируют широкую сеть проекций с разными областями головного мозга.

Сенсорные релейные таламические ядра осуществляют первичную обработку информации и направляют ее в соответствующие проекционные области неокортекса. Ассоциативные ядра таламуса контролируют состояние сознания, отвечают за готовность к восприятию и концентрацию внимания, за формирование шкалы ощущений (болевое воздействие, нейтральное – приятное).

Все области неокортекса функционально связаны с таламусом и формируют иерархически организованную нейронную сеть. Представления о многоуровневой организации таламокортикальной сети были четко сформулированы Sherman и Guillery в 2006 г. [2] и проиллюстрированы на рис. 2. К структурам 1-го порядка относятся релейные ядра таламуса и первичные проекционные неокортекса. Эти структуры получают прямые входы (управляющие афференты, drive) от периферических отделов анализаторов. Таламические ядра высших порядков являются ассоциативными и получают иннервацию от областей коры младшего порядка. Таламические нейроны отсылают прямые «управляющие» афференты к 4-му слою неокортекса (показаны на рис. 2 черными линиями) и получают обратные «модулирующие» афференты от пирамидных нейронов 6-го слоя (показаны на рис. 2 серыми линиями).

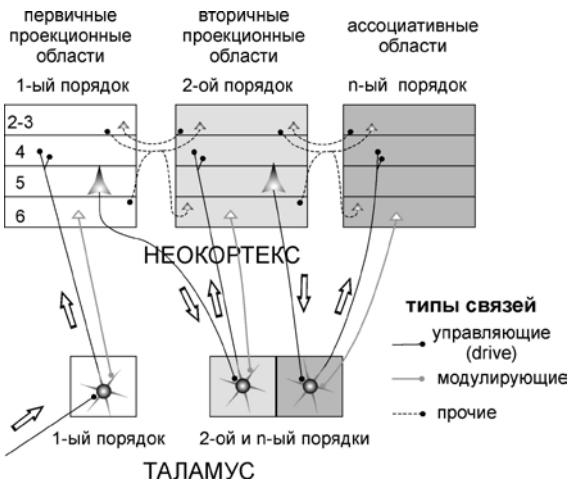


Рис. 2. Иерархическая организация таламокортикальной нейронной сети. Схема основана на представлениях Sherman и Guillery (2006) [2]

Таламокортикальные ритмы

Стрелочки на рис. 2 демонстрируют направление распространения возбуждения. Реверберация возбуждения в таламокортикальной сети сопровождается появлением устойчивых электромагнитных колебаний, которые можно зарегистрировать на поверхности головного мозга в виде таламокортикальных ритмов. У человека это классический альфа-ритм в состоянии бодрствования (частота 8–13 Гц) и альфа-подобные ритмы – роландический ритм, каппа-ритм (8–12 Гц), тау-ритм (10–12 Гц) (см. обзоры [3–5]). Кроме того, у человека и у млекопитающих во время медленного сна таламокортикальная сеть генерирует сонные веретена (с частотой около 12–14 Гц). Изменения частотно-временных свойств альфа-составляющей на ЭЭГ и сонных веретен свидетельствуют о нарушении функций таламокортикальной системы при разных патологиях нервной системы (см., напр. [5, 6]).

Концепция

В 1999 году Родольфо Льинас (Rodolfo Llinás) и его соавторы сформулировали концепцию таламокортикальной дизритимии, основанную на исследованиях МЭГ у человека и предлагающую механизм нарушения ритмической активности в таламокортикальной сети при неврологических и психических заболеваниях [7]. Благодаря исследованию на животных в 2001–2005 годах в концепцию были внесены дополнения, касающиеся ключевой роли механизмов торможения в развитии таламокортикальной дизритимии [8–10]. Суть этой концепции такова. У пациентов в состоянии покоя на магнитоэнцефалограмме (МЭГ) часто наблюдают снижение частоты альфа-ритма вплоть до диапазона тета-частот (4–8 Гц) при одновременном усилении бета/гамма-активности (25–50 Гц). Причиной этого служит снижение мембранного потенциала таламических нейронов (гиперполяризация) вследствие избыточности тормозных входов внутри таламуса. В состоянии устойчивой гиперполяризации мембраны происходит деинактивация низкопороговых кальциевых каналов Т-типа, вследствие чего таламические нейроны приобретают способность генерировать колебания в диапазоне тета-частот (4–8 Гц) [8]. Изменения ритмической активности таламуса можно обнаружить в связанных областях коры. В этом случае дизритмический механизм запускается снизу вверх (bottom-up, т. е. от таламуса к коре), как при некоторых нейропсихиатрических расстройствах (периферическая нейрогенная боль, болезнь Паркинсона). В иной ситуации дизритмический механизм вызван дисфункцией неокортекса (top-down) и сопровождается нарушением влияния коры на таламус, как при генерализованных формах эпилепсии, психических расстройствах и центральной нейрогенной боли [7].

Крысы WAG/Rij – модель для изучения таламокортикальной дизритмии

Абсанс-эпилепсия – это особое неврологическое расстройство, характеризующееся короткими эпизодами утраты сознания (абсанс), во время которых на электроэнцефалограмме появляются высокоамплитудные разряды в форме «пик-волна». Аномалии таламокортикальной системы у крыс WAG/Rij с генетической предрасположенностью к абсанс-эпилепсии хорошо изучены [11, 12], что делает этих животных удобным объектом для изучения механизмов таламокортикальной дизритмии.

Результаты электроэнцефалографических исследований у крыс WAG/Rij свидетельствуют о наличии следующих признаков таламокортикальной дизритимии. Во-первых, появление коротких эпизодов ритмической активности в диапазоне 3–12 Гц с максимальной амплитудой в двух диапазонах: дельта- (1–4 Гц) и тета-частот (5–9 Гц), характерных для состояния «судорожной готовности» [13, 14]. Об этих особенностях мы докладывали на III конференции НДКИ в 2011 году [15]. Во-вторых, наличие проэпилептических 5–9 Гц колебаний, которые недавно были описаны нами [16].

На рис. 3 показаны частотно-временные портреты проэпилептических 5–9 Гц колебаний, построенные с использованием непрерывного вейвлетного преобразования на базе материнского вейвлета Морле. Отличительными свойствами паттернов являлись следующие: 1) резкое начало; 2) главный максимум частоты в диапазоне от 5 до 10 Гц; 3) наличие пиков и соответствующих им всплесков мощности на вейвлетной поверхности в диапазоне 1-й гармоники от 10 до 20 Гц. Проэпилептический паттерн на рис. 3, А, представляет собой модифицированную форму сонного веретена, а на рис. 3, Б, – незрелый пик-волновый разряд, средняя частота которого составляла около 6 Гц, т. е. ниже, чем у зрелых пик-волновых разрядов (8–10 Гц).

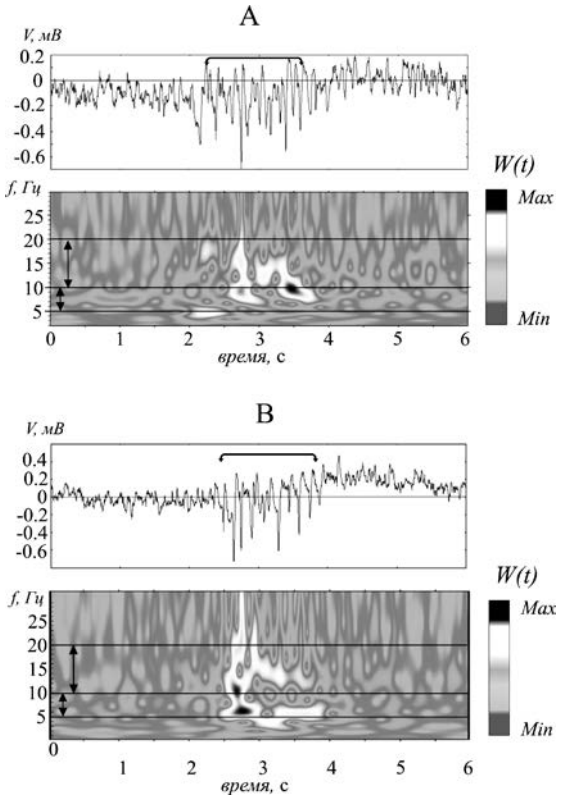


Рис. 3. Примеры проэпилептических паттернов на лобной ЭЭГ у крысы WAG/Rij (выделены сверху) и соответствующие вейвлетные поверхности [16]

В большой группе экспериментальных крыс WAG/Rij мы выделили особей без признаков абсанс-эпилепсии («бессимптомный» фенотип). Число проэпилептических 5–9 Гц колебаний у крыс WAG/Rij с «бессимптомным» фенотипом было ниже, чем у крыс с «эпилептическим» фенотипом (таблица). С возрастом в обеих группах крыс количество проэпилептических паттернов на ЭЭГ значимо снижалось. При этом у крыс с «эпилептическим» фенотипом снижение числа проэпилептических паттернов сопровождалось ростом числа эпилептических разрядов. Возможно, с возрастом проэпилептическая активность приобретала эпилептический характер и форму зрелых пик-волновых разрядов. Таким образом, могла происходить

своеобразная «эпилептизация» ритмической активности у особей с «эпилептическим» фенотипом. У крыс с «бессимптомным» фенотипом возрастное снижение числа проэпилептических паттернов не сопровождалось появлением пик-волновых разрядов, т. е. происходило угасание проэпилептической активности на ЭЭГ.

Группа	Число проэпилептических 5–9 Гц колебаний (± стандарт. откл.)	
	Возраст 5 месяцев	Возраст 7 месяцев
WAG/Rij («эпилептический» фенотип) n = 17 крыс	55 ± 11	44 ± 10
WAG/Rij («бессимптомный» фенотип) n = 9 крыс	46 ± 16	36 ± 6

Итак, с возрастом проявления дизритмии у крыс WAG/Rij усиливаются, т. е. развитие таламокортикальной дизритмии носит прогрессирующий характер. Фундаментальные исследования этого явления у пациентов весьма ограниченны, поскольку требуются регулярные обследования. Решением этой проблемы может служить экспериментальный подход с использованием животных с врожденной патологией таламокортикальной системы. В нашей работе основой для диагностики таламокортикальной дизритмии является частотно-временной анализ электроэнцефалограмм с использованием непрерывного вейвлетного преобразования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-015-00242а).

Литература

1. *Angevine, J.B. Jr., Cotman, C.W.* Principles of neuroanatomy. New York : Oxford University Press, 1981. 393 p.

2. *Sherman, S.M., Guillery, R.W.* Exploring the thalamus and its role in cortical function. 2nd ed. Cambridge : MIT Press, 2006. 484 p.

3. *Александров, М.В., Чухловин, А., Павловская, М., Костенко, И., Архипова, Н.* Альфа-тета-континуум: нейрофизиологические механизмы генерации // Медицинский алфавит. 2017. Т. 1, вып. 14. С. 46–50.

4. *Базанова, О.М.* Современная интерпретация альфа-активности электроэнцефалограммы // Успехи физиологических наук. 2009. Т. 40, вып. 3. С. 32–53.

5. *Niedermeyer, E.* Alpha rhythms as physiological and abnormal phenomena // Int. J. Psychophysiol. 2001. Vol. 26, № 1/3. P. 31–49 ; doi: 10.1016/S0167-8760(97)00754-X.

6. *Schulman, J.J. [et al.].* Imaging of thalamocortical dysrhythmia in neuropsychiatry // Front Hum Neurosci. 2011. Vol. 5, № 69 ; doi: 10.3389/fnhum.2011.00069. eCollection 2011.

7. *Llinás, R.R. [et al.].* Thalamocortical dysrhythmia: a neurological and neuropsychiatric syndrome characterized by magnetoencephalography // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1999. Vol. 96, № 26. P. 15222–15227 ; doi: 10.1073/pnas.96.26.15222.

8. *Jeanmonod, D. [et al.].* Thalamocortical dysrhythmia II. Clinical and surgical aspects // Thalamus & Related Systems. 2001. Vol. 1, № 3. P. 245–254 ; doi: 10.1017/S1472928801000267.

9. *Llinás, R., Ribary, U., Jeanmonod, D., Cancro, R., Kronberg, E., Schulman, J., Zonenshayn, M., Magnin, M., Morel, A., Siegmund, M.* Thalamocortical dysrhythmia I. Functional and imaging aspects // Thal. Rel. Sys. 2001. Vol. 1. P. 237–244.

10. *Llinás, R. [et al.].* Rhythmic and dysrhythmic thalamocortical dynamics: GABA systems and the edge effect // Trends Neurosci. 2005. Vol. 28, № 6. P. 325–333 ; doi: 10.1016/j.tins.2005.04.006.

11. *Coenen, A.M., van Luijtelaar, E.L.* Genetic animal models for absence epilepsy: a review of the WAG/Rij strain of Rats // Behav. Genetics. 2003. Vol. 33. P. 635–655.

12. *van Luijtelaar, G., Coenen, A.* Genetic models of absence epilepsy: new concepts and insights // Encyclopedia of Basic Epilepsy Research / editor Philip A. Schwartzkroin. V. 1. Oxford : Academic Press, 2009. P. 1–8.

13. *Ситникова, Е.Ю. [и др.].* Анализ электрической активности головного мозга при абсанс-эпилепсии: прикладные аспекты нелинейной динамики // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, вып. 6. С. 173–182.

14. *van Luijtelaar, G. [et al.].* Spike-wave discharges in WAG/Rij rats are preceded by delta and theta precursor activity in cortex and thalamus // Clin. Neurophysiol. 2011. Vol. 122. P. 687–695 ; doi: 10.1016/j.clinph.2010.10.038.

15. *Ситникова, Е.Ю. [и др.].* Анализ ритмической активности головного мозга при абсанс-эпилепсии (работа с электроэнцефалограммами) // Труды конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2011». Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2011. С. 190–192.

16. *Ситникова, Е.Ю. [и др.].* Принципы диагностики незрелой эпилептической (проэпилептической) активности на ЭЭГ у крыс с генетической предрасположенностью к абсанс-эпилепсии // Информационно-управляющие системы. 2019. Т. 1. С. 89–97 ; doi: 10.31799/1684-8853-2019-1-89-97.

Распознавание ошибки по сигналам мозга в межстимульный интервал

А.И. Скакун[1,2], В.В. Балаев[2], К.В. Ефимов[2,3], Ю.В. Котович[1,2], А.О. Тетерева[2], О.Д. Кашеварова[2], П.И. Малиновская[2], М.С. Атанов[2], О.В. Мартынова[2], Г.А. Иваницкий[2]

[1]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
[2]Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва
[3]Московский физико-технический институт

История вопроса о детекции ошибки

В настоящий момент накоплено достаточное количество психофизиологических свидетельств того, что при совершении *ошибочного* действия в мозгу человека актуализируется ряд нейрофизиологических механизмов. Работа этих механизмов находит конкретное отражение в регистрируемых сигналах мозга (электрическая активность и уровень метаболизма). Важно, что признаки совершенной ошибки появляются в сигналах мозга и в случае, если человек не осознает ее, а в некоторых парадигмах исследования – и до начала моторного акта, с которым всегда так или иначе связно действие, в том числе ошибочное. Следует заметить, что если признак ошибки появляется до моторного ответа, можно говорить уже не о *детекторе*, а о *детерминаторе* ошибки.

Впервые «детектор ошибки» был обнаружен Натальей Петровной Бехтеревой и ее сотрудниками в конце 1960-х годов [1–3]. Тогда же ею был предложен и сам термин.

Открытие детектора ошибки было сделано с помощью метода определения концентрации кислорода в тканях мозга. Метод был основан на том физическом эффекте, что сила электрического тока, проходящего через золотые электроды, вживленные в мозг человека в ходе стереотаксической операции, зависит от концентрации кислорода в мозговой ткани. Ученик Н.П. Бехтеревой В.Б. Гречин, реализовавший данную методику, опередил время на 20–30 лет, выполнив свою работу задолго до появления ПЭТ и фМРТ. Последние регистрируют, по сути, то же явление: потребление кислорода тканями мозга.

Используя указанный метод и рассматривая вызванные изменения концентрации кислорода в тканях мозга при выполнении больными теста на память, Н.П. Бехтерева и В.Б. Гречин обнаружили, что некоторые области мозга реагировали изменениями метаболизма *только при ошибочном* выполнении теста [1]. Позднее в том же научном коллективе концепция детектора ошибки получила дальнейшее развитие в экспериментах с регистрацией активности отдельных нейронов. Регистрация проводилась электродами, вживленными в мозг больных в ходе нейрохирургических операций [2, 3]. В проведенных исследованиях было обнаружено, что, во-первых, нейроны реагируют на ошибку и в случае ее не осознания человеком и, во-вторых, такие нейроны имеются не только в коре больших полушарий мозга, но и в подкорковых структурах, а именно в базальных ганглиях. Причем в последнем случае наблюдается работа *детерминатора* ошибки, т. е. связанный с ошибкой сигнал регистрируется до начала моторного ответа.

В 1990-е годы этот же круг явлений стал изучаться в зарубежных лабораториях с использованием метода поверхностно регистрируемых вызванных потенциалов (ВП), синхронизированных с началом моторного ответа в простых тестах (например, Go/NoGo). В многочисленных работах было обнаружено, что при совершении ошибки возникает негативная волна в диапазоне задержек 80–150 мс относительно начала моторного акта. Эта волна была названа «негативностью ошибки», или error-related negativity (ERN). Одной из первых работ, описывающих данный феномен, была работа [4].

В большинстве случаев, когда речь идет об ERN, предполагается, что источник этой волны лежит в передней поясной извилине. При этом волна ERN всегда регистрируется *после* моторного ответа. Она возникает и при не осознании ошибки человеком, но в этом случае ее амплитуда уменьшается [5]. Сравнивая результаты по объективным маркерам ошибки, полученные в России и за рубежом, можно видеть, что в случае детектора ошибки по Бехтеревой и в случае ERN речь идет о несколько разных явлениях. А именно, в первом случае некоторые электрографические признаки ошибки возникают *до* моторного ответа и имеют своим источником базальные ганглии, в то время как во втором случае признак всегда наблюдается *после* моторного ответа, а источником его является передняя поясная кора.

Это противоречие было разрешено в работах Ю.Д. Кропотова с сотрудниками [6]. ВП, привязанный по времени к ответу на тест, был разложен на компоненты, соответствующие разным предполагаемым источникам активности. Разложение провели с помощью метода независимых компонент. В результате обнаружилось (далее цитируем по работе [6]), что «один из источников генерируется в дорсальной (когнитивной) части передней поясной извилины, другой генерируется нейронами в задней части поясной извилины, а третий компонент генерируется в премоторной области коры *до совершения ошибки*. Он локализован в части коры, которая является корковым выходом базальных ганглиев». Таким образом, оказалось, что (опять цитата) «детерминаторы ошибок, обна-

руженные Н.П. Бехтеревой в базальных ганглиях, отражаются в компонентах вызванных потенциалов, генерируемых в премоторной коре, в то время как детекторы ошибок, свидетельствующие о совершенной ошибке и вносящие вклад в ERN, локализованы в поясной извилине».

Здесь следует отметить, что все вышеописанные результаты получены при анализе активности мозга, привязанной по времени к событию (ответ на задание). Кроме того, в более ранних работах Н.П. Бехтеревой результаты получены в острых экспериментах на открытом мозге в ходе нейрохирургических операций (что было во всех случаях оправдано тактикой лечения). Ниже в этой статье мы опишем метод детекции совершенной ошибки по характерным ритмам ЭЭГ, проявляющимся в течение нескольких секунд после ответа.

Эффект Зейгарник

Наши результаты (описанные ниже) имеют непосредственное отношение к так называемому эффекту Зейгарник [7]. Этот психологический эффект заключается в том, что человек лучше запоминает прерванные действия, чем завершенные. Эффект был обнаружен основательницей патопсихологии, советским психологом Блюмой Вульфовной Зейгарник на раннем этапе ее научной карьеры, когда в конце 1920-х годов она выполняла свою дипломную работу в Берлинском университете под руководством выдающегося психолога Курта Левина.

Б.В. Зейгарник поставила эксперимент, в котором экспериментатор просил испытуемых за определенное время решить ряд задач. При этом испытуемому не давали завершить часть из них, ссылаясь на нехватку времени. Позже испытуемому предлагали перечислить все задания, которые он запомнил. Было показано, что среди сохранившихся в памяти действий отношение незавершенных действий к завершенным равно 1,9. В качестве объяснения результата предполагалось, что в случае прерывания решения задачи возникал определенный уровень эмоционального напряжения, который не получал своей разрядки в решении задачи и, в свою очередь, способствовал сохранению этого «неудовлетворительного» действия в памяти.

Когнитивные паттерны ритмов мозга

На протяжении двух десятилетий (начиная с середины 1990-х годов) мы наблюдаем, что при выполнении человеком когнитивных заданий в его ЭЭГ устанавливаются характерные паттерны ритмов мозга. Эти ритмические паттерны обладают следующими принципиальными свойствами: 1) они характерны и уникальны для каждого вида мыслительной деятельности, например для пространственного и вербального мышления; 2) они высоко индивидуальны, но для данного человека устойчивы и сохраняются годами (медленно меняясь с возрастом); 3) паттерны, соответствующие разным типам мышления, находятся друг с другом в определенных отношениях, формируя пространство, изоморфное пространству психологических характеристик осуществляемой когнитивной деятельности; 4) паттерны настолько хорошо выражены, что использование простой искусственной нейронной сети в качестве классификатора позволяет распознавать тип осуществляемого мышления по отрезкам ЭЭГ длиной в несколько секунд (начиная с 4 с) с надежностью около 90 % (в среднем по людям). В наиболее общем виде приведенные результаты изложены в статье [8].

В настоящей работе мы применили имеющиеся у нас методы распознавания характера мышления по ритмам ЭЭГ к данным, записанным в межстимульный интервал, т. е. после ответа испытуемых. Было обнаружено, что возникающие в этот период паттерны ритмов мозга достоверно отражают как факт совершения ошибки в предшествующем задании (т. е. могут служить ее детектором), так и факт незавершенности задания. В последнем случае мы, очевидно, видим электрографический маркер нейрофизиологических механизмов, обуславливающих эффект Зейгарник.

Методы

Были обработаны данные, полученные ранее в другом исследовании. В нем приняли участие 19 здоровых испытуемых – мужчин и женщин в возрасте от 20 до 30 лет, студентов или имеющих высшее образование. Испытуемые решали по 40 задач каждого из двух типов – вербального и пространственного. Задания предъявлялись на экране монитора вперемешку; их примеры показаны на рис. 1.

Рис. 1. Примеры вербального (решить анаграмму) и пространственного (какую нижнюю фигуру можно собрать из верхних фрагментов?) заданий

Регистрация ЭЭГ велась с помощью малогабаритного 19-канального электроэнцефалографа «Энцефалан» производства фирмы «Медиком-МТД» (Таганрог). Помимо ЭЭГ записывали два канала электроокулограммы и метки обо всех событиях эксперимента, как то: подача и снятие стимула, его тип (задание пространственное или вербальное), индивидуальный номер задания, ответ испытуемого (нажатие кнопки и ее номер), факт не решения задачи в срок.

Решив вербальную задачу (анаграмму), испытуемый нажимал любую кнопку и произносил найденное слово вслух; ответ фиксировался. Решив пространственную задачу, испытуемый нажимал одну кнопку из трех, обозначая правильную фигуру. После нажатия кнопки задание уби-

ралось с экрана. Время решения было ограничено 40 секундами; по истечении этого времени задача также убиралась. Межстимульный интервал составлял от 7 до 9 с, в это время экран был черным.

Таким образом, мы знали правильность решения всех заданий, на которые был дан ответ, а также все случаи отсутствия ответа (т. е. незаконченного решения).

Вся обработка данных проводилась на индивидуальной основе, т. е. раздельно для каждого человека.

Артефакты движений глаз и морганий удалялись с помощью регрессионной процедуры с использованием двух записанных каналов электроокулограммы.

Затем из записей ЭЭГ выделялись промежутки, соответствующие межстимульным интервалам, при этом для каждого выделенного интервала фиксировалась информация о типе предшествующей задачи (вербальная или пространственная), а также об исходе ее решения: дан правильный ответ, дан неправильный ответ или решения не было.

Для сигнала ЭЭГ, соответствующего каждому межстимульному интервалу, в каждом отведении (канале ЭЭГ) вычислялся квадрат модуля преобразования Фурье (с необходимой нормировкой на длительность интервала). Полученные «единичные спектры» (т. е. спектры единичных реализаций ЭЭГ) сглаживались трехточечным фильтром в три прохода. В дальнейшей обработке учитывались частоты от 5 до 20 Гц. Спектральный анализ ЭЭГ применяли по той причине, что спектры дают адекватную оценку наполненности ЭЭГ *ритмами*.

Все отсчеты «единичных спектров» для данного интервала ЭЭГ, в указанном диапазоне частот, во всех отведениях, выстроенные в ряд, давали вектор, характеризующий пространственно-частотный паттерн ЭЭГ, установившийся после решения очередного задания. Векторы, соответствующие разным межстимульным интервалам, подвергались классификации по типам последних. В качестве классификатора использовались либо простая искусственная нейронная сеть – перцептрон без скрытых слоев, либо алгоритм *k* ближайших соседей.

Вся выборка данных одного испытуемого делилась на две части: обучающую выборку, по которой обучался классификатор, и тестовую, по которой он тестировался. Классификация (т. е. процесс обучения/тестирования) проводилась на два класса – для разных пар типов межстимульных интервалов. Пары сравниваемых типов межстимульных интервалов мы дальше будем называть *контрастами*, наподобие того, как это делается в фМРТ.

Показателем успешности классификации служил процент правильного распознавания (ППР) типа межстимульного интервала. Порог достоверно неслучайной классификации зависел от количества векторов в каждом классе, т. е. от характера разбиения межстимульных векторов на типы. Ниже мы приводим только результаты достоверно неслучайной классификации. Это означает, что приведенные ППР могли получиться случайно с вероятностью меньшей 0,05.

Результаты

Различные контрасты типов межстимульных интервалов были определены путем комбинирования информации о характере предыдущего задания (вербальное или пространственное) и об исходе решения (решил правильно, решил неправильно, не решил). В таблице приведены достоверно неслучайные средние по испытуемым результаты классификации для некоторых контрастов и для разных классификаторов (перцептрон и *k* соседей).

ППР для разных контрастов межстимульных интервалов для двух классификаторов

Контраст типов межстимульных интервалов	ППР	
	П	*k*
Правильные ответы на обе задачи *vs.* неправильные ответы на обе задачи	–	75,1 ± 10,7
Правильные ответы на вербальную задачу *vs.* неправильные ответы на вербальную задачу	–	90,8 ± 9,0
Наличие ответа для обеих задач *vs.* отсутствие ответа для обеих задач	73,1 ± 7,5	71,9 ± 8,9
Наличие ответа для простр. задачи vs. отсутствие ответа для простр. задачи	–	87,0 ± 14,0
Отсутствие ответа и правильные ответы для обеих задач *vs.* неправильные ответы для обеих задач	70,8 ± 6,8	83,9 ± 5,6
Отсутствие и наличие ответа на пространственную задачу *vs.* отсутствие и наличие ответа на вербальную задачу	62,6 ± 8,5	–

Примечание:
П – перцептрон; *k* – алгоритм *k* ближайших соседей.

Обсуждение результатов

Выяснилось, что классификатор *k* ближайших соседей работает в целом лучше, чем перцептрон.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что и совершение ошибки, и незавершенность задания имеют свое отражение в паттернах ритмов ЭЭГ, появляющихся после снятия задания, в межстимульный интервал.

В контрасте, когда сравнивались все правильные ответы со всеми неправильными (независимо от типа решаемого перед тем задания), разделение типов интервалов оказалось возможным с помощью алгоритма *k* ближайших соседей. Очевидно, что мы наблюдаем работу не описанного ранее детектора ошибки, работающего по ритмам ЭЭГ без жесткой привязки к событию (ответу испытуемого). Таким образом, *тонический* «след» от совершенной ошибки (в большинстве случаев неосознанной) остается в ЭЭГ в течение нескольких секунд после ответа. Эффект имеет место в случае

решения обоих типов заданий (первая строка таблицы), но при решении вербальной задачи он более выражен (вторая строка таблицы).

Незавершенность задания опознается обоими классификаторами – как перцептроном, так и алгоритмом *k* ближайших соседей (третья и четвертая строки таблицы). Следовательно, психологические механизмы, о которых говорила Б.В. Зейгарник, находят свое отражение в паттернах ритмов мозга.

По непонятной нам пока причине контраст, разделяющий отсутствие ответа плюс правильные ответы от неправильных ответов, отрабатывается классификаторами лучше, чем контраст «правильные ответы – неправильные ответы» (пятая строка таблицы).

Удивительным оказался тот факт, что в межстимульном интервале ЭЭГ сохранила «следы» типа перед тем решаемой задачи. Паттерны ритмов ЭЭГ *во время решения* задач разделяются с надежностью около 90 % (как сказано выше); при анализе ЭЭГ в межстимульные интервалы цифра ППР снижается до ~63 %, что все равно выше порога неслучайности. По-видимому, специфические психологические – а соответственно, и нейрофизиологические – механизмы, включившиеся при выполнении задания конкретного типа, не выключаются сразу. Возможно, они выключаются лишь после появления задания другого типа, когда испытуемому необходимо перестроиться на новый тип мышления.

Работа была поддержана грантом РФФИ № 19-013-00925.

Литература

1. *Bechtereva, N.P., Gretchin, V.N.* Physiological foundations of mental activity // Int. Rev. Neurobiol. 1968. V. 11. P. 329–352.

2. *Bechtereva, N.P., Medvedev, S.V., Abdullaev, Y.G.* Neural correlate of mental error detection in the human brain cortex // Biomed. Sci. 1991. V. 2. P. 301-305.

3. *Bechtereva, N.P., Shemyakina, N.V., Starchenko, M.G., Danko, S.G., Medvedev, S.V.* Error detection mechanisms of the brain: background and prospects // Int. J. Psychophys. 2005. V. 58, № 2/3. P. 227–234.

4. *Gehring, W.J., Coles, M., Meyer, D., Donchin, E.* The error-related negativity: an event-related brain potential accompanying errors // Psychophysiology. 1990. V. 27. S. 34.

5. *Scheffers, M.K., Coles, M.G.* Performance monitoring in a confusing world: error-related brain activity, judgments of response accuracy, and types of errors // J. Experimental Psychology. Human Perception and Performance. V. 26, № 1. P. 141–151.

6. *Kropotov, J.D.* Quantitative EEG, event related potentials and neurotherapy. L. : Elsevier, 2009. 533 p.

7. *Зейгарник, Б.В.* Патопсихология. М. : Изд-во Московского университета, 1986. 288 с.

8. *Иваницкий, Г.А.* Индивидуальные устойчивые паттерны ритмов мозга человека как отражение психических процессов // Современные технологии в медицине. 2019. Т. 11, № 1. С. 116–131.

Традиция когнитивного подхода научных школ Мандельштама – Андронова – Неймарка

С.Е. Сляднев, Н.Г. Панкрашкина, В.Е. Хроматов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Единая научная программа Андроновской научной школы теории нелинейных колебаний активно разрабатывалась несколькими поколениями, заложенные ею традиции продолжают оказывать влияние на умы и мотивацию молодых исследователей и сегодня.

Выработанное научной школой «нелинейное мышление», культура умственного восприятия и преобразования информации в знания, общая система ценностей, методика научного подхода дали прорыв в НТР и обеспечили обороноспособность СССР.

Характеристика научной школы

Московская школа физиков основана в 1925 г. Л.И. Мандельштамом, она была «питательной средой» для его учеников и спустя шесть лет стала производной для научной школы теории нелинейных колебаний, открытой в г. Горьком А.А. Андроновым.

Знакомство с А.А. Андроновым, в свою очередь, оказало существенное влияние на работу широко известных ученых Г.С. Горелика, М.А. Айзермана, Л.С. Понтрягина, В.Л. Гинзбурга. Нельзя не восхититься честностью, целеустремленностью и исключительной преданностью своему делу коллектива этой школы. Понимание мотиваций и кодекса чести ученого может дать молодому специалисту противоядие от излишнего индивидуализма и сегодня.

Несмотря на методологическую преемственность, Горьковская школа была качественно иной по сравнению со школой Мандельштама, а именно школой узкого профиля: она имела единственную исследовательскую программу, разработкой и развитием которой занимались все ее сотрудники.

Вопрос о принадлежности ученого школе узкого профиля, по определению, решается просто. Если сотрудник реализует ее исследовательскую программу, то можно говорить о принадлежности к данной школе. А.А. Андронов не поощрял учеников, если они пытались решить задачу методами, не свойственными его школе. В таких случаях следовала рекомендация изменить подход либо подбиралась новая задача. Эти противоречия должны были разрешаться, и долгая жизнь школы (как минимум, 50 лет) позволяет заключить, что решение было успешным [1].

Выбор научного исследования

А.А. Андронов отказался от исследований в прогремевшей на весь мир передовой квантовой теории и сосредоточился на «более скромной» теории колебательных процессов. Такой выбор, по всей видимости, был сделан из-за того, что теория нелинейных колебаний нуждалась в собственном методе, который еще только предстояло разработать. Желание быть у основ характеризует самого Александра Александровича как ученого-завоевателя, открывающего новые законы и предлагающего новые методы.

Уверенность в важности выбранного исследования была подкреплена детерминистическим мировоззрением и пониманием колебаний как общего «интернационального языка» естественных наук. Школа Андронова была полностью сосредоточена на решении конкретной задачи по разработке общей теории нелинейных колебаний, т. е. существовал примат конечной цели, на достижении которой сосредотачивались все усилия сотрудников. Был дан вектор исследованиям и возможность апробации работ внутри школы, что обеспечило их высокий научный уровень, в провинциальном городе удалось создать научную площадку мирового значения [2].

Междисциплинарность и «нелинейное» мышление Андроновской школы

Теория нелинейных колебаний не является физической теорией. Это наука об общих закономерностях в динамических системах любой природы, не имеющая привязки к конкретной области естествознания. Равным образом ее нельзя назвать и чисто математической теорией, так как она генетически связана с техникой.

Понятия колебательной закономерности, устойчивости движения, динамической системы в процессе становления теории утратили свой изначальный физический смысл. Это обстоятельство сделало теорию колебаний междисциплинарной. В дальнейшем из нее развилась общая теория динамических систем, а следом и кибернетика, и всюду обнаруживается инженерно-технический генотип нового, синтетического знания.

Подобное узловое расположение теории в общей структуре научного знания делает возможным многообразное ветвление в сторону той или иной прикладной области (медицина, САПР, газодинамика и гидродинамика и т. д.). Развитие научной школы Андронова и ее необычайно долгая жизнь показывают истинность этого суждения [1–3].

Хотя в теории нелинейных колебаний основными фигурантами являются дифференциальные уравнения и можно было бы назвать данную теорию чисто математической, не в этом состоит ее главная особенность. Леонид Исаакович Мандельштам подчеркивал, что «именно физика учит нас, как допрашивать дифференциальное уравне-

ние». В теории колебаний такой математический объект, как предельный цикл, получил не только геометрическую (замкнутая траектория, к которой стягиваются все окрестные), но и физическую интерпретацию (устойчивый колебательный режим). Это дает исследователю, помимо геометрической, еще и физическую интуицию, что требует от ученого некоторой инженерной подкованности [4].

Для того чтобы исследовать динамическую систему, сотрудники Горьковской школы использовали следующие подходы: *геометрический* для исследования структуры разбиения фазового пространства, *параметрический* для выяснения зависимости структуры фазового пространства от параметров системы, *колебательный* для выявления общих колебательных закономерностей. Сопоставляли две картинки: фазовое пространство и пространство параметров, в зависимости от выбора точки в пространстве параметров (равноценный выбор новой динамической системы) видоизменялась структура разбиения фазового пространства, иногда совершая качественный скачок (бифуркацию). Выяснялась зависимость одной картинки от другой, и этот процесс за свойственную ему специфическую наглядность и привлекаемый оригинальный жаргон, Габриель Семенович Горелик назвал «эмбриологическим подходом» [5]. Одна картинка сменяется другой, и тип качественного перехода зачастую интуитивен (например, как говорил А.А. Андронов, «особая точка беременна предельным циклом»). Отсюда и формируется новая интуиция, получившая название «нелинейное мышление» [6].

Развитие теории динамических систем

Совместно с Л.С. Понтрягиным в 1937 г. А.А. Андронов ввел понятие грубой динамической системы как системы устойчивой по отношению к малым изменениям ее правых частей. Грубые системы небольшой размерности моделируют реально существующие явления, тогда как негрубые системы образуют в пространстве параметров «перегородки», отделяющие друг от друга области, заполненные грубыми системами. Негрубые системы отвечают бифуркационным значениям параметров, при переходе через которые фазовый портрет динамической системы меняется качественно.

При введении понятия грубости А.А. Андронов исходил из физических соображений. Фундаментальная теоретическая схема по программе Александра Александровича должна была быть «пропущена через природу», которая накладывала на нее свой отпечаток. Оказалось необходимым привлечь два понятия об устойчивости системы – устойчивость по Ляпунову и устойчивость по параметрам самой системы.

Неисследованные закономерности появлялись при переходе от фазовой плоскости к пространству. Если количество дифференциальных уравнений первого порядка больше двух, то характер возможных движений чрезвычайно усложняется (перефразируя Бореля, А.А. Андронов говорил, что «в теории колебаний, как в счете дикарей, много равняется трем»). Теории, позволяющей качественно исследовать такие системы, в то время не существовало.

А.А. Андронов нашел ключ для преодоления указанной «пропасти» у самого Анри Пуанкаре, а также в работах Дейвида Джорджа Биркгофа: метод секущей поверхности Пуанкаре и теория точечных преобразований. На их основе был разработан основной метод теории нелинейных колебаний для исследования многомерных систем, который позволил расширить понятие динамической системы [1].

Результаты деятельности Горьковской научной школы

Междисциплинарный характер понятия динамической системы предполагает широкий спектр возможных приложений теории, что подтверждается тем кругом задач, которые решались данной научной школой (например, задача о персептроне как модели обучения или задача о движении на перекрестке).

Развитие метода точечных отображений охватило как детерминированные, так и стохастические процессы, как дискретные, так и распределенные, задаваемые как дифференциальными уравнениями, так и марковскими цепями, графами и другими средствами. Ключевыми в теории динамических систем являются понятия состояния и оператора эволюции, описывающего переход (какой угодно природы) одного состояния в другое. Фазовое пространство – это пространство всевозможных состояний системы. При таком общем взгляде динамическая система может описывать и механический процесс (например, обработка изделия на станке), и вычислительную схему, и любой процесс переработки информации, совершаемый согласно некоторому алгоритму.

Рассмотрение всевозможных движений динамической системы изначально не предполагалось А.А. Андроновым, так как задача теории нелинейных колебаний по существу более скромная. Она состояла в нахождении периодических и квазипериодических движений. Потенциал развития оказался заложен в самой фундаментальной теоретической схеме, которая была разработана для решения этих задач. Этот потенциал и раскрывался Горьковской школой на протяжении многих десятилетий после смерти Учителя [1].

Становление и развитие региональной кибернетики

Ю.И. Неймарк – ученик А.А. Андронова, известный ученый в области механики, теории устойчивости, теории колебаний и автоматического управления – всю вторую половину XX столетия активно занимался работой в области нелинейной теории колебаний для проектирования и определения оптимальных параметров сложных механических систем с быстро вращающимся твердым телом. Например, гироскопов, использующихся в

самолетах, спутниках, ракетах; центрифугах для разделения химических фракций разной плотности элементов при производстве ядерного топлива для атомных электростанций. Им были выполнены и открытые работы по качественной теории дифференциальных уравнений и математической кибернетике (бифуркации динамических систем, метод малого параметра, поисковые методы оптимизации, теория массового обслуживания).

Теоретические результаты научной школы Неймарка «Динамика, механика, управление и математическое моделирование» были связаны с механизмом для выработки непрогнозируемых движений. Юрий Исаакович, обладая инженерной интуицией, был первоклассным экспертом по теории управления и динамики автоматических систем, его коллектив в НИИ прикладной математики и кибернетики выполнял стратегические инвестиционные проекты по заказу оборонных заводов (регулировка радаров, реактивных двигателей ракет, настройка и контроль средств атаки и защиты критически значимых военных комплексов), поэтому исследования имели самый высокий уровень секретности.

Ю.И. Неймарк занимался исследованием динамических систем с гомоклиническими структурами и стохастическими движениями, возникающими в детерминированных динамических системах. В теории управления ученый развивал исследования адаптивных систем автоматического управления, связанные с понятиями управляемости и наблюдаемости, на переломе XX–XXI веков появились его статьи, посвященные построению и исследованию простых математических моделей, имеющих исключительную роль в познании мира.

Обобщения Ю.И. Неймарка, сделанные в «Игровой модели человеческого общества», показали ту грань, которую следует не только назвать интеллектуальной красотой, но и задуматься о том, какое они имеют отношение к многовековой истории человечества и нашей судьбе. Свое виденье мира он выразил в форме верлибра [6].

Заключение

Сохраненные в стенах ННГУ им. Н.И. Лобачевского традиции Андроновской школы оказали большое влияние на развитие теории нелинейных колебаний и общей теории динамики систем. Эти междисциплинарные теории дают «интернациональный язык» исследования природных, инженерно-технических, социальных, экономических, биологических процессов. В ретроспективе мы видим, как исследование колебательных закономерностей привело сначала к возникновению теории нелинейных колебаний, затем к понятию машины как «грубой» динамической системы, а позже к синтетической науке кибернетике.

Общая система ценностей ученого и методика научного исследования наблюдаемой реальности, культура умственного восприятия и преобразования информации в знания (cognitus), умение «нелинейно мыслить» способствуют развитию современного и формированию будущего информационного общества.

Литература

1. *Сляднев С.Е.* Научная школа А.А. Андронова и её значение для мировоззрения ученого // Материалы музея ВМК ННГУ. Электронный архив «2017».
2. *Бойко Е.С.* Школа академика А.А. Андронова. М. : Наука, 1983.
3. *Бойко Е.С.* Александр Александрович Андронов (1901–1952). М. : Наука, 1991.
4. *Печенкин А.А.* Леонин Исаакович Мандельштам. Исследование, преподавание и остальная жизнь. М. : Логос, 2011.
5. *Горелик Г.С.* Из истории развития теории колебаний в СССР // Динамика систем : межвуз. сб. 1977. Вып. 12. С. 3–19.
6. *Панкрашкина Н.Г., Хроматов В.Е.* Нестандартный ученый. Жизненный путь профессора Ю.И. Неймарка // Сборник материалов Второй Всероссийской научно-практической конференции «Наследие В.Г. Короленко. Стратегии гуманизма» с международным участием. Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2019. С. 256–259.

Научение чередованию двух форм поведения как формирование индивидуального опыта

А.А. Созинов[1,2], А.В. Бахчина[1], Л.С. Жиганов[2], Ю.В. Гринченко[1,2,3], Ю.И. Александров[1,2,3]

[1]Институт психологии РАН, Москва
[2]Государственный академический университет гуманитарных наук, Москва
[3]Московский государственный психолого-педагогический университет
email: alesozinov@yandex.ru

Введение

Чередование заданий, предполагающее многократную смену форм поведения, традиционно рассматривается как проявление исполнительного контроля (например, [15]) с различными стратегиями «обработки» прерываний текущего поведения [3]. С позиций системно-эволюционного подхода к изучению психики и поведения [9], развиваемых нашим коллективом [2], быстрая смена одной формы поведения на другую рассматривается как следствие формирования индивидуального опыта чередования конкретных заданий. Иными словами, мы предполагаем, что научение чередованию и научение чередуемым формам поведения подчиняются общим закономерностям. Поэтому целью настоящего исследования было выявление динамики системной организации поведения чередования с помощью установления соответствия между изменениями двух групп показателей: выполнения двух чередуемых форм поведения и их мозгового обеспечения.

С нашим представлением о чередовании согласуется три группы феноменов: 1) при варьировании параметров заданий не удается идентифицировать одну, «специальную», зону мозга, активность которой специфически связана со сменой поведения и не зависит от заданий [13, 14]; 2) чередование обеспечивается не готовым универсальным механизмом перехода от одного поведения к другому, оно формируется в результате научения [8, 16]; более того, смене поведения в условиях вынужденного прерывания можно не только научиться, но и использовать этот опыт в новых условиях (т. е. осуществить перенос научения – Jones, Moss, 2019); 3) мозговые процессы, сопровождающие прерывание поведения перед сменой задания, принципиально сходны с процессами, проявляющимися в ситуации новизны [12].

Отдельные компоненты чередования связываются с активностью цингулярной коры мозга млекопитающих [17–19]. В то же время регистрация активности нейронов этой области показывает связь их активаций с выполнением самих чередуемых форм поведения – циклов нажатия животными на педаль для получения пищи в кормушке на двух сторонах экспериментальной камеры [4, 5, 10]. В частности, при сравнении наборов специализаций нейронов, активность которых была зарегистрирована в течение первой и второй недель регистрации, нами было выявлено, что доля нейронов, специализированных относительно подхода к кормушке, больше на первой неделе, чем на второй, а нейронов, специализированных относительно подхода к педали, наоборот, больше на второй неделе [6]. В этом исследовании регистрация активности нейронов начинается в первые дни научения чередованию, поэтому различия наборов специализаций, по-видимому, связаны с формированием поведения чередования. В пользу этого предположения говорит и другой ранее полученный результат: изменения частоты спайков от цикла к циклу после смены формы поведения связаны с вовлечением нейрона в обеспечение поведения, в частности с тем, является ли он специализированным относительно систем актов этого поведения [1, 7].

В соответствии с представлениями о научении как о формировании структуры индивидуального опыта системная организация поведения зависит от истории его формирования (например, [4]), и при формировании нового опыта происходит реорганизация ранее сформированного опыта [11]. Если перечисленные особенности активности нейронов связаны с формированием поведения чередования, можно предположить, что при научении чередованию двух форм поведения динамика показателей смены чередуемых форм поведения будет зависеть от их последовательности в процедуре обучения. Кроме этого, научение чередованию будет сопровождаться изменением показателей выполнения чередуемых форм поведения. Для проверки этого предположения были проанализированы показатели выполнения животными циклического сложного пищедобывательного поведения и сопоставлены с выявленными ранее изменениями мозгового обеспечения этого поведения.

Методика

Восемь кроликов породы Советская шиншилла были обучены выполнению циклического инструментального пищедобывательного поведения на двух симметричных сторонах экспериментальной камеры, каждая из которых оснащена педалью и кормушкой в смежных углах. Подача пищи при нажатии на соответствующую педаль производится только на одной, «эффективной», стороне камеры. Смена одной «эффективной» стороны на противоположную происходит при выполнении не менее 7 циклов, включающих нажатие на педаль и захват пиши из кормушки (т. е. «результативных»

циклов). Процедура обучения животных и фиксации поведенческих событий (а также регистрации нейронной активности) подробно описана нами ранее [6].

После обучения животных нажатию на педали чередование двух форм поведения (на левой и правой сторонах) и регистрацию нейронной активности продолжали в течение двух недель. Сигналом смены стороны служило отсутствие корма в кормушке после нажатия на педаль (вследствие того, что «эффективной» стала другая сторона). Скорость перехода оценивали по количеству актов поведения, совершенных животным после последнего результативного цикла на одной стороне до первого результативного цикла на другой. В каждом цикле оценивали время перемещения от вынимания головы из кормушки до нажатия на педаль («движение к педали») и время от отпускания педали до опускания головы в кормушку («движение к кормушке»).

Выборка сравниваемых значений формировалась в соответствии с записями активности нейронов, в течение которых животные выполняли чередование поведения на двух сторонах экспериментальной камеры без остановки со стороны экспериментатора. Медианы продолжительности движений к педали и к кормушке на первой и второй по порядку обучения стороне и медианы количества актов, совершенных при переходе на первую и вторую сторону, сравнивались между двумя периодами («первым» и «вторым»): 4 и менее, 5 и более дней от начала чередования циклов нажатия на педаль. Для анализа данных использовали процедуры исключения выбросов (значений, превышающих три стандартных отклонения), нормализации распределения данных (по Тьюки), непараметрические и параметрические критерии сравнения распределений, предусмотренные в пакете программ SPSS (версия 11).

Результаты и их обсуждение

Количество актов, совершенных при переходе на вторую по порядку обучения сторону, во втором периоде было меньше, чем в первом. При применении непараметрического критерия Манна – Уитни это различие выявлялось на уровне тенденции (U = 1151,5; p = 0,065) и достигало уровня значимости только при использовании параметрического T-критерия (t_{110} = 2,09; p = 0,039). Различие значений этого показателя перехода на первую сторону было недостоверным (U = 1194,0; t_{107} = –1,51; p > 0,1), однако направление этого различия было обратным (рис. 1). При использовании дисперсионного анализа для повторных измерений было выявлено взаимодействие факторов «Период» и «Сторона» ($F_{1,62}$ = 4,14; p = 0,046). Следовательно, изменение скорости перехода связано с историей формирования чередуемых форм поведения: в начале чередования переход на первую сторону осуществлялся быстрее, чем на вторую, а затем эти показатели становились сходными.

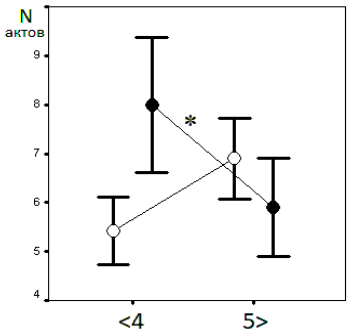


Рис. 1. Количество актов, совершенных при переходе на первую (белые круги) и вторую (черные круги) по порядку обучения сторону в течение первого (<4) и второго (5>) периодов эксперимента (среднее и стандартная ошибка среднего). Значимые различия обозначены звездочкой

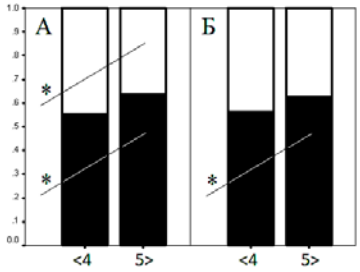


Рис. 2. Средняя доля времени движения к педали (черный цвет) и движения к кормушке (белый цвет) в цикле поведения животных на первой (А) и второй (Б) стороне камеры. Остальные обозначения как на рис. 1

Продолжительность движения к педали различалась между периодами как на первой (рис. 2, А), так и на второй (рис. 2, Б) стороне (U < 2000; p < 0,001). Хотя продолжительность движения к кормушке достоверно различалась между периодами только на первой стороне (U = 2817,5; p = 0,005). Это было связано с тем, что на первой стороне, в отличие от второй (p > 0,6), продолжительность всего цикла поведения была ниже в течение второго периода, чем первого (U = 2910,0; p = 0,009), относительное время подхода к педали было больше в течение второго периода по сравнению с первым, а время подхода кормушке, наоборот, было меньше в течение второго периода. Следовательно, в ходе формирования поведения чередования относительная продолжительность движения к педали увеличивается, а движения к кормушке – уменьшается. Можно предположить, что эти различия, а также различия долей нейронов задней цингулярной коры, специализированных относительно подхода к педали и кормушке, между первым и вторым периодами, выявленные нами ранее [6], связаны с изменением системной организации чередуемых форм поведения при формировании поведения чередования.

Заключение

На основе анализа показателей выполнения животными циклического сложного пищедобывательного поведения и сопоставления с выявленными ранее изменениями мозгового обеспечения

этого поведения выявлено, что при научении чередованию двух форм поведения динамика показателей смены чередуемых форм поведения зависит от их последовательности в процедуре обучения. Научение чередованию сопровождается изменением показателей выполнения чередуемых форм поведения. Следовательно, полученные результаты находятся в соответствии с предположением, что быстрая смена одной формы поведения на другую является следствием формирования индивидуального опыта чередования конкретных заданий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 17-06-00653).

Литература

1. *Александров Ю.И., Шевченко Д.Г., Горкин А.Г., Гринченко Ю.В.* Динамика системной организации поведения в его последовательных реализациях // Психологический журнал. 1999. Т. 20, № 2. С. 82-89.

2. *Александров Ю.И., Горкин А.Г., Созинов А.А., Сварник О.Е., Кузина Е.А., Гаврилов В.В.* Консолидация и реконсолидация памяти : психофизиологический анализ // Вопросы психологии. 2015. № 3. С. 133-144.

3. *Величковский Б.Б., Злоказова Т.А., Капица М.С.* Эффективность обработки прерываний в условиях свободных и вынужденных переключений // Экспериментальная психология. 2010. Т. 3, № 2. С. 45-57.

4. *Горкин А.Г., Шевченко Д.Г.* Различия в активности нейронов лимбической коры кроликов при разных стратегиях обучения // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 1995. Т. 45, № 1. С. 90-100.

5. *Кузина Е.А., Горкин А.Г., Александров Ю.И.* Активность нейронов ретросплениальной коры крыс на ранних и поздних этапах консолидации памяти // Журнал ВНД им. И.П. Павлова. 2015. Т. 65, № 2. С. 248-253.

6. *Созинов А.А., Гринченко Ю.В., Казымаев С.А., Александров Ю.И.* Показатели стабильности и динамики мозгового обеспечения нового поведения // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды IV Всероссийской конференции. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 220-222.

7. *Созинов А.А., Гринченко Ю.В., Александров Ю.И.* Динамика мозгового обеспечения поведения после перехода от задания к заданию при их чередовании // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2017 / под ред. В.А. Антонца [и др.]. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2017. С. 206-207.

8. *Тимофеева Н.О.* Нейронная организация индивидуальных форм адаптивного поведения : автореф. докт. дисс. М., 2002. 54 с.

9. *Швырков В.Б.* Основные этапы развития системно-эволюционного подхода в психофизиологии // Психологический журнал. 1993. Т. 14, № 3. С. 15-27.

10. *Alexandrov Yu.I., Grinchenko Yu.V., Laukka S., Järvilehto T., Maz V.N., Svetlajev I.A.* Acute effect of ethanol on the pattern of behavioral specialization of neurons in the limbic cortex of the freely moving rabbit // Acta Physiologica Scandinavica. 1990. V. 140. P. 257-268.

11. *Alexandrov Yu.I., Grinchenko Yu.V., Shevchenko D.G., Averkin R.G., Matz V.N., Laukka S., Korpusova A.V.* A subset of cingulate cortical neurons is specifically activated during alcohol-acquisition behaviour // Acta Physiol. Scand. 2001. V. 171. P. 87-97.

12. *Barcelo F., Escera C., Corral M.J., Periáñez J.A.* Task switching and novelty processing activate a common neural network for cognitive control // Journal of Cognitive Neuroscience. 2006. V. 18, № 10. P. 1734-1748.

13. *Calcott R.D., Berkman E.T.* Neural correlates of attentional flexibility during approach and avoidance motivation // PLoS ONE. 2015. V. 10, № 5. Art. e0127203.

14. *Dreher J.C., Koechlin E., Ali S.O., Grafman J.* The roles of timing and task order during task switching // Neuroimage. 2002. V. 17, № 1. P. 95-109.

15. *Malagon-Vina H., Ciocchi S., Passecker J., Dorffner G., Klausberger T.* Fluid network dynamics in the prefrontal cortex during multiple strategy switching // Nature Communications. 2018. V. 9, № 309. P. 1-13.

16. *Peters G.J., David C.N., Marcus M.D., Smith D.M.* The medial prefrontal cortex is critical for memory retrieval and resolving interference // Learning & Memory. 2013. V. 20, № 4. P. 201-209.

17. *Poulsen C., Luu P., Davey C., Tucker D.M.* Dynamics of task sets: evidence from dense-array event-related potentials // Cognitive Brain Research. 2005. V. 24. P. 133-154.

18. *Premereur E., Janssen P., Vanduffel W.* Functional MRI in macaque monkeys during task switching // Journal of Neuroscience. 2018. V. 38, № 50. P. 10619-10630.

19. *Sarafyazd M., Jazayeri M.* Hierarchical reasoning by neural circuits in the frontal cortex // Science. 2019. V. 364, № 6441. Art. eaav8911.

Психофизиологические закономерности решения межгрупповых конфликтных ситуаций при вариации условий социального присутствия

И.М. Созинова[1,2], Ю.И. Александров[1,2]

[1]Московский государственный психолого-педагогический университет; email: eiole@yandex.ru
[2]Институт психологии РАН, Москва

Введение

Моральные правила способствуют регулированию взаимодействий и отношений между индивидами. Каждое свое действие или действие другого человек сознательно или бессознательно оценивает с позиции моральных правил [2, 6, 10].

Моральная оценка действия фиксируется в структуре индивидуального опыта вместе с системой, реализация которой направлена на актуализацию этого действия. При этом на протяжении жизни человека моральная оценка действия может меняться. Достаточно широко это было продемонстрировано на примерах снижения межгрупповых предубеждений с возрастом [22]. С позиции системно-эволюционного подхода реализация любого поведенческого акта (в том числе и при решении моральных дилемм) связана с актуализацией систем, сформированных на разных этапах онтогенеза [1, 3, 5, 11, 18, 23]. При этом позднее и ранее сформированные системы могут иметь противоречащие друг другу характеристики [11].

С позиции единой концепции сознания и эмоций [1] актуализация позднее сформированных систем направлена на более дифференцированное соотношение индивида со средой, характеристикой которого является более высокий уровень «сознательности», рациональности. Роль «сознательного» контроля при снижении межгрупповых предубеждений была продемонстрирована на уровне мозгового обеспечения поведения в экспериментах с функциональной магнитно-резонансной томографией [20]. При снижении «сознательного» контроля действий может снижаться вклад позднее сформированных систем, в том числе связанных с «новыми» моральными характеристиками [4]. Так, в условиях стресса, при котором происходит временное угнетение активности «новых», более дифференцированных систем, у взрослых снижалась справедливая поддержка «чужого» при решении дилемм «свой» – «чужой» [7].

На примере решения моральных дилемм «свой» – «чужой» нами было показано увеличение доли поддержки членов чужих групп с возрастом. При этом у детей, применявших более поздно сформированную стратегию поведения – преобладающую поддержку «чужого», наблюдалось системное рассогласование, выраженное в изменениях соотношения мощностей низко- и высокочастотного компонентов вариабельности сердечного ритма (LF/HF ВСР) [9]. На основании полученных данных было выдвинуто предположение о большей субъективной трудности решения дилемм в пользу «чужого» из-за необходимости согласовывать противоречащие характеристики одновременно актуализирующихся систем, сформированных на разных этапах онтогенеза. Эта субъективная трудность может быть связана с внешним контролем поведения в лице экспериментатора, так как наличие «наблюдателя» увеличивает степень социального присутствия, тем самым, вероятно, повышая уровень «сознательного» контроля поведения [19]. Целью нашего исследования являлось изучение психофизиологических особенностей формирования моральной оценки действия при решении дилемм «свой» – «чужой» при варьировании условий социального присутствия.

Методика

В исследовании принимали участие дети 4–11 лет (N = 77 при непосредственном предъявлении дилемм – повышенная степень социального присутствия; N = 80 при опосредствованном предъявлении дилемм – сниженная степень социального присутствия). На протяжении каждой серии эксперимента проводилась регистрация сердечного ритма с помощью беспроводного датчика Zephyr HxM и/или оптической биомыши SWOP-048 и программного обеспечения HR-reader (В.В. Кожевников) и IBM-input (А.К. Крылов) соответственно.

В *первой серии* эксперимента (условия с повышенной степенью социального присутствия) дилеммы предъявлялись экспериментатором при непосредственном взаимодействии с ребенком. Вначале с ребенком проводилась беседа по заранее подготовленному экспериментатором плану (далее этот этап эксперимента будет обозначаться как «фон») [17], затем предлагалось решить ряд иллюстрированных моральных дилемм «свой» – «чужой». Дилемма предъявлялась в виде устного нарратива, в центре которого был конфликт из-за ограниченного ресурса, который был необходим члену своей группы для необязательного блага, а члену чужой группы для выживания. Ребенка просили выбрать, кому бы он отдал ресурс, и объяснить свой ответ.

Во *второй серии* эксперимента (условия со сниженной степенью социального присутствия) дилеммы предъявлялись опосредствованно с помощью планшетного устройства OS Android с использованием программы Heart Dilemma (И.С. Созинова, О.Р. Громазин). Вначале проводилось обучение управлению кнопками, затем тестовая серия, в ходе которой ребенку нужно было вы-

брать одну из двух картинок, соответствующую задаваемому вопросу (например, «На какой картинке изображено солнце?»). Затем ребенку предлагалось решить ряд дилемм. Аудиоинструкция и картинки к дилеммам были идентичны используемым в первой серии эксперимента.

Пульсограммы были перекодированы в ряды RR-интервалов с помощью программы Neuru (А.К. Крылов). Ритмограммы сердца были отфильтрованы и обработаны с помощью программы RRv7 (И.С. Шишалов). В результате были получены спектральные показатели вариабельности сердечного ритма: мощности низко- и высокочастотного спектра ВСР (LF и HF), общая мощность ВСР (TP), а также соотношение мощностей низко- и высокочастотного спектра ВСР (LF/HF).

Ответы на дилеммы были закодированы как «0», если ребенок выбирал ответ в пользу члена своей группы, и «1», если ребенок выбирал в пользу члена чужой группы. Впоследствии была посчитана доля поддержки члена чужой группы для каждого участника исследования: сумма баллов по всем дилеммам, разделенная на количество дилемм.

Результаты

В результате анализа ответов на дилеммы не было получено различий в долях ответов поддержки члена чужой группы между детьми, решавшими дилеммы в разных условиях социального присутствия (критерий Манна – Уитни, $p > 0{,}05$).

В ходе анализа спектральных характеристик вариабельности сердечного ритма было выявлено, что значения показателя LF/HF выше у детей, которые решали дилеммы при непосредственном взаимодействии с экспериментатором по сравнению с детьми, решавшими дилеммы с помощью планшета, в возрастных группах 4–5 лет, 6–7 лет и 8–9 лет только во время предъявления дилемм (критерий Манна – Уитни; $p < 0{,}01$), но не в фазе «фона» (критерий Манна – Уитни; $p > 0{,}05$). При этом в возрастной группе 10–11 лет была обнаружена обратная закономерность: более высокие значения показателя LF/HF наблюдались в «фоне» у детей, решавших дилеммы с помощью планшета, нежели у детей, решавших дилеммы устно (Манна – Уитни; $p < 0{,}05$), а не во время решения моральных дилемм (Манна – Уитни; $p > 0{,}05$).

Также были обнаружены более низкие значения показателя общей мощности вариабельности сердечного ритма (TP) на протяжении всего эксперимента у детей 4–5 лет, решавших дилеммы с помощью планшета, по сравнению с детьми того же возраста, решавшими устно (Манна – Уитни; $p < 0{,}05$). Такие же различия были обнаружены у остальных возрастных групп только при решении моральных дилемм, но не в «фоне» (Манна – Уитни; $p < 0{,}05$ при решении дилемм; $p > 0{,}05$ в «фоне»).

Для анализа психофизиологических особенностей решения моральных дилемм в разных условиях социального присутствия у детей, придерживающихся разных стратегий решения моральных дилемм, мы разделили все данные на две группы: «поддерживающие чужих» – те, кто в более чем половине дилемм выбрал сторону «чужого»; и «поддерживающие своих» – те, кто в более чем половине дилемм выбрал помощь «своему».

Были обнаружены более высокие показатели LF/HF у «поддерживающих чужих» детей по сравнению с детьми, «поддерживающими своих» только в условиях устного предъявления дилемм (критерий Манна – Уитни, $p < 0{,}05$ для устного предъявления дилемм и $p > 0{,}05$ для планшетного предъявления дилемм).

Общая направленность различий в спектральных показателях ВСР у детей, отвечавших на дилеммы с помощью планшета, по сравнению с детьми, отвечавшими при предъявлении дилемм экспериментатором, представлена в таблице.

Сопоставление
спектральных показателей ВСР детей,
отвечавших на дилеммы с помощью планшета и устно

Возрастная группа	Спектральные показатели	Фон	Решение моральных дилемм
4–5 лет	LF/HF	–	–
	TP	↓	↓
6–7 лет	LF/HF	–	↑
	TP	–	↓
8–9 лет	LF/HF	–	↑
	TP	–	↓
10–11 лет	LF/HF	↑	–
	TP	–	↓

Примечание:
Стрелками обозначено направление изменений спектральных показателей ВСР у детей, проходивших эксперимент с помощью планшета, по сравнению с детьми, отвечавшими устно. Стрелками обозначены только достоверные различия, критерий Манна – Уитни, $p < 0{,}05$.

Кроме того, было обнаружено повышение значений показателя LF/HF и снижение значений показателя TP во время решения дилемм по сравнению с фоном только в условиях со сниженной степенью социального присутствия во всех возрастных группах (критерий Вилкоксона, $p < 0{,}05$ у детей, решавших дилеммы на планшете; $p > 0{,}05$ у детей, устно решавших дилеммы при взаимодействии с экспериментатором).

Обсуждение

При сопоставлении результатов двух серий экспериментов (решения моральных дилемм при варьировании условий социального присутствия) не было обнаружено различий в общей доле поддержки членов чужих групп на разных этапах онтогенеза. Но был обнаружен более поздний переход к преобладающей стратегии поддержки членов чужих групп у детей, решавших дилеммы на планшете по сравнению с детьми, решавшими дилеммы при взаимодействии с экспериментато-

ром. Вероятно, снижение степени социального присутствия может приводить к снижению «сознательного» контроля собственного поведения и сопровождаться процессами временной системной дедифференциации – обратимого снижения вклада более дифференцированных систем индивидуального опыта в реализуемое поведение [4].

Отмечается, что более низкие значения показателя TP и более высокие значения показателя LF/HF специфичны для ситуаций острого стресса [8, 12–15], для которых характерна дедифференциация и активация адаптационных ресурсов организма. Вероятно, такие ситуации сопровождаются системным рассогласованием, так как актуализация имеющегося набора систем не приводит к ожидаемому результату. В рамках представленного исследования более высокие значения показатели LF/HF и более низкие значения показателя TP в целом наблюдались во время решения моральных дилемм при опосредствованном предъявлении, т. е. в условиях сниженной степени социального присутствия. При этом у детей 4–5 лет сниженная общая мощность наблюдалась еще и в «фоне». А у детей 10–11 лет более высокие значения показателя LF/HF наблюдались в «фоне», но не во время решения дилемм.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в целом ситуация решения дилемм на планшете является более трудной для детей на разных этапах онтогенеза. Это можно объяснить отсутствием социального окружения, которое так или иначе транслирует моральные правила, «подсказывает», как лучше поступить. Ж. Пиаже также отмечал принципиальную важность социального окружения, особенно взрослых, для понимания и обучения моральным правилам детей [21].

Отсутствие различий в значениях показателя LF/HF в возрасте 10–11 лет во время решения моральных дилемм у детей, решавших дилеммы с помощью планшета и устно, а также более высокие значения LF/HF в «фоне» у детей того же возраста, решавших дилеммы с помощью планшета, по сравнению с детьми, решавшими дилеммы непосредственно с экспериментатором, может отражать процессы интериоризации моральных правил. То есть для детей 10–11 лет уже не так значим взрослый для оценки действий с точки зрения моральных норм, так как эти нормы постепенно становятся неотъемлемой характеристикой его индивидуального опыта [16].

Отсутствие различий при разделении на группы по стратегиям решения моральных дилемм в условиях планшетного предъявления можно объяснить с точки зрения более сильного стресса при решении дилемм на планшете по сравнению с устным опросом в целом. Вероятно, ситуация решения подобных конфликтов на планшетном устройстве без «подсказок» социального окружения является более новой и для детей, предпочитающих помощь членам своей группы, и для детей, предпочитающих помощь членам чужих групп.

Таким образом, полученные результаты вносят вклад в понимание специфики социализации в телекоммуникативной среде, а также значения непосредственного контакта со взрослым для понимания и интериоризации моральных норм.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-29-22045_мк.

Литература

1. *Александров Ю.И.* Эмоция и мораль // Методология и история психологии. 2008. Т. 3, № 3. С. 186-208.

2. *Александров Ю.И., Александрова Н.Л.* Субъективный опыт, культура и социальные представления. М. : Институт психологии РАН, 2009. 320 с.

3. *Александров Ю.И., Греченко Т.Н., Гаврилов В.В. [и др.].* Закономерности формирования и реализации индивидуального опыта // ЖВНД. 1997. Т. 47, № 2. С. 243-260.

4. *Александров Ю.И., Сварник О.Е., Знаменская И.И., Колбенева М.Г., Арутюнова К.Р., Крылов А.К., Булава А.И.* Регрессия как этап развития. М. : Институт психологии РАН, 2017. 191 с.

5. *Арутюнова К.Р., Бахчина А.В., Крылов А.К., Александров Ю.И.* Воздействие алкоголя на сердечный ритм и оценку действий при решении моральных дилемм // Экспериментальная психология. 2017. Т. 10, № 1. С. 5-22.

6. *Гусейнов А.А.* Нравственность в свете негативной этики // Мораль: разнообразие понятий и смыслов : сборник научных трудов : к 75-летию академика А.А. Гусейнова / отв. ред. и сост. О.П. Зубец. М. : Альфа-М, 2014. С. 13-34.

7. *Знаменская И.И., Марков А.В., Бахчина А.В., Александров Ю.И.* Отношение к «чужим» при стрессе: системная дедифференциация // Психологический журнал. 2016. Т. 37, № 4. С. 44-58.

8. *Некрасова М.М., Полевая С.А., Парин С.Б., Шишалов И.С., Бахчина А.В.* Способ определения стресса : патент России. 2014. (2531443.2014).

9. *Созинова И.М., Бахчина А.В., Александров Ю.И.* Вариабельность сердечного ритма при разных стратегиях решения моральных дилемм «свой» – «чужой» детьми на последовательных стадиях онтогенеза // Труды V Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2017». Н. Новгород : ИПФ РАН, 2017. С. 208-209.

10. *Шадриков В.Д.* Поведение как фактор формирования совести // Психология. 2006. Т. 3, № 4. С. 3-13.

11. *Швырков В.Б.* Введение в объективную психологию: нейрональные основы психики. М. : Институт психологии РАН, 1995. 162 с.

12. *Парин С.Б., Некрасова М.М., Полевая С.А., Шишалов И.С., Бахчина А.В.* Способ определения стресса : патент РФ на изобретение № 2531443.2014 ; опубл. 20.10.2014.

13. *Полевая С.А., Некрасова М.М., Рунова Е.В., Бахчина А.В., Горбунова Н.А., Брянцева Н.В., Кожевников В.В., Шишалов И.С., Парин С.Б.* Дискретный мониторинг и телеметрия сердечного ритма в процессе интенсивной работы на компьютере для оценки и профилактики утомления и стресса // Медицинский альманах. 2013. № 2 (26). С. 151-155.

14. *Полевая С.А., Рунова Е.В., Некрасова М.М., Федотова Е.В., Бахчина А.В., Ковальчук А.В., Шишалов И.С., Парин С.Б.* Телеметрические и информационные технологии в диагностике функционального состояния спортсменов // Клиническая медицина. 2012. Т. 4. С. 94-98.

15. *Полевая С.А., Парин С.Б., Бахчина А.В., Некрасова М.М., Шишалов И.С., Рунова Е.В., Кожевников В.В.* Система определения функционального состояния

группы людей : патент РФ на полезную модель № 129680 ; опубл. 27.06.2013.

16. Психология нравственности / под ред. А.Л. Журавлева, А.В. Юревича. М. : Институт психологии РАН, 2010.

17. *Созинова И.М., Бахчина А.В., Александров Ю.И.* Изменение показателей сердечного ритма до, во время и после решения моральных дилемм детьми 4–11 лет // Экспериментальная психология. 2017. Т. 10, № 3. С. 97-109.

18. A*lexandrov Y.I.* Cognition as systemogenesys // Anticipation : Learning from the Past : The Russian / Soviet Contributions to the Science of Anticipation. Springer, 2015. P. 193-220.

19. *Fulk J., Schmitz J., Steinfield C.* A social influence model of technology use // Organization and communication technology. Newbury Park : Sage, 1990. P. 117-142.

20. *Phelps E.A., O'Connor K.J., Cunningham W.A., Funayama E.S., Gatenby J.C., Gore J.C., Banaji M.R.* Performance on indirect measures of race evaluation predicts amygdala activation // J. Cognitive Neurosci. 2000. V. 12, № 5. P. 729-738.

21. *Piaget J.* The moral judgment of the child. New York : Free Press, 1965/1932. 498 p.

22. *Raabe T., Beelmann A.* Development of ethnic, racial, and national prejudice in childhood and adolescence: a multinational meta-analysis of age differences // Child development. 2011. V. 82, № 6. P. 1715-1737.

23. *Sozinova I.M., Sozinov A.A., Laukka S.J., Alexandrov Y.I.* The prerequisites of prosocial behavior in human ontogeny // Int. J. Cognitive Research in Science, Engineering and Education. 2017. V. 5, № 1. P. 57-63.

Реконструкция сети нейроосцилляторов по экспериментальным данным локальных потенциалов мозга

И.В. Сысоев[1,2], A.K. Lüttjohann[3]

[1]Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
[2]Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
[3]Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Взаимодействие между отделами мозга в норме и патологии активно изучается уже несколько десятилетий. Основным источником информации при этом являются сигналы электромагнитной активности мозга в форме электроэнцефалограмм (ЭЭГ), магнитоэнцефалограмм (МЭГ), сигналов локальных потенциалов поля (также известны как внутричерепные ЭЭГ) и сигналы отдельных нейронов, снимаемые как внеклеточно, так и внутриклеточно. Для исследования связанности исторически применялись самые различные меры, как ненаправленные (корреляционная функция, функция когерентности, функция взаимной информации), так и разработанные принципиально для выделения направленного взаимодействия (энтропия переноса, причинность по Грейнджеру, частная направленная когерентность [1], методы фазовой динамики), как линейные, так и нелинейные [2, 3].

При использовании направленных методов диагностики взаимодействия, основанных на построении эмпирических прогностических моделей, таких как причинность по Грейнджеру и частная направленная когерентность, решающим компонентом успеха является правильный выбор структуры модели. Это уже было неоднократно показано, в том числе при исследовании связанности в мозге по сигналам локальных потенциалов [4]. При этом класс систем, используемых в качестве моделей, оказывается достаточно узок. Несмотря на различные оптимизации, в том числе введение нелинейности разных типов [5, 6], подбора временных лагов, используемых при реконструкции вектора состояния по скалярному временному ряду, и дальностей прогноза [4], использования неравномерного вложения, все построенные модели представляли собою фактически многомерные отображения последования. В то же время в последние годы существенного прогресса удалось добиться в области реконструкции ансамблей динамических систем с непрерывным временем, включая системы с запаздыванием в собственной динамике и запаздыванием в связях. В том числе нами был разработан подход по реконструкции ансамблей обобщенных осцилляторов Ван-дер-Поля [7]. Подход дает возможность по векторным временным рядам колебаний ансамбля (по одному скалярному ряду от каждого элемента) реконструировать систему связей и собственные нелинейные функции отдельных элементов, если они могут быть представлены в виде осцилляторов типа Ван-дер-Поля, Рэлея, Фитц-Хью – Нагумо или иных систем второго порядка.

В данной работе разработанный в [7] подход адаптируется для сигналов локальных потенциалов крыс при абсансных приступах. Для этого модель для отдельного узла переписывается к виду

$$\begin{aligned}&\ddot{x}_i + g_i(x_i)\dot{x}_i + g'_i(x_i)\dot{x}_i^3 + \\ &+ g''_i(x_i)\dot{x}_i^5 + f_i(x_i) = \\ &= \sum k_{i,j}(x_j - x_i) + \sum k'_{i,j}(\dot{x}_j - \dot{x}_i),\end{aligned} \qquad (1)$$

где x_i суть временные ряды локальных потенциалов от различных отведений, f_i – неизвестные нелинейные потенциальные функции, g_i, g'_i и g''_i – функции диссипации, также неизвестные, $k_{i,j}$ и $k'_{i,j}$ – неизвестные коэффициенты связи. Функции g_i, g'_i и g''_i аппроксимируются кусочно-линейными функциями, а функция f_i рассчитывается таблично, поскольку длина ее описания выступает в роли целевой функции. Минимизация целевой функции, следуя [7], проводится линейным методом наименьших квадратов и позволяет оценить параметры функций диссипации и коэффициенты связи.

Рассматривались временные ряды локальных потенциалов крыс линии WAG/Rij (генетические модели абсансной эпилепсии) из 8 отведений: 3 слоев соматосенсорной коры (4-го, 5-го и 6-го), двух частей ретикулярного ядра таламуса (каудальной и ростральной), а также антериального, вентропостериального медиального и постериального ядер. Ряды были получены во время многочасового эксперимента с предварительно вживленными электродами, измерены с частотою выборки 2048 Гц с помощью 16-канального АЦП, усилены до динамического диапазона ±5 В, а также отфильтрованы аналоговым полосовым фильтром в диапазоне 0,1–99 Гц.

Применимость подхода обосновывается тем, что во время пик-волновых разрядов колебания отдельных нейронов синхронизуются и их динамику можно упрощенно моделировать в виде системы связанных осцилляторов второго порядка с шумом [8].

С использованием данного подхода нам удалось получить ряд характеристик сигналов индивидуальных отведений и связей, согласующихся с общими выводами работы [4].

Данная работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 19-12-00201).

Литература

1. *Bezruchko B.P., Smirnov D.A.* Extracting knowledge from time series: an introduction to nonlinear empirical modeling. Springer, 2010.

2. *Sakkalis V.* Review of advanced techniques for the estimation of brain connectivity measured with EEG/MEG // Computers in Biology and Medicine. 2011. Vol. 41, iss. 12. P. 1110–1117.

3. *Gourevitch B., Le Bouquin-Jeannes R., Faucon G.* Linear and nonlinear causality between signals: methods, examples and neurophysiological applications // Biological Cybernetics. 2006. Vol. 95(4). P. 349–369.

4. *Sysoeva M.V., Sitnikova E., Sysoev I.V., Bezruchko B.P., Luijtelaar G. van.* Application of adaptive nonlinear Granger causality: disclosing network changes before and after absence seizure onset in a genetic rat model // Journal of Neuroscience Methods. 2014. Vol. 226. P. 33–41.

5. *Chen Y., Rangarajan G., Feng J., Ding M.* Analyzing multiple nonlinear time series with extended granger causality // Phys. Lett. A. 2004. Vol. 324(1). P. 26–35.

6. *Marinazzo D., Pellicoro M., Stramaglia S.* Nonlinear parametric model for Granger causality of time series // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 73. Art. 066216.

7. *Sysoev I.V.* Reconstruction of ensembles of generalized Van der Pol oscillators from vector time series // Physica D. 2018. Vol. 384/385. P. 1–11.

8. *Сысоева М.В., Кузнецова Г.Д., Сысоев И.В.* Моделирование сигналов электроэнцефалограмм крыс при абсансной эпилепсии в приложении к анализу связанности между отделами мозга // Биофизика. 2016. Т. 61(4). С. 782–792.

Результат введения агониста CB_1-рецепторов (WIN55,212-2) крысам линии WAG/Rij

М.В. Сысоева[1], C.M. van Rijn[2], И.В. Сысоев[3]

[1]Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
[2]Donders Centre for Cognition, Radboud University, Nijmegen, the Netherlands
[3]Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Эпилепсия – это хроническое заболевание головного мозга, характеризующееся повторными приступами с нарушением двигательных, чувствительных, вегетативных, мыслительных или психических функций, возникающими вследствие избыточного нейронного возбуждения. На современном этапе развития медицины предложено много классификаций форм эпилепсии, которые основываются на локализации эпилептического очага в головном мозге. Различают фокальную и генерализованную формы. При фокальной эпилепсии (к которой, в частности, относятся лимбические судороги) идет формирование локальной эпилептической сети (чаще в лимбических структурах одного полушария). При генерализованной эпилепсии (к которой относятся абсансы) аномально возбужденные сети широко распределены в мозге и вовлекают структуры обоих полушарий. В качестве одной из причин многих видов генерализованной эпилепсии часто рассматривают патологическое изменение связанности в мозге, как правило, приводящее к частичной синхронизации в мозге во время приступов. Эффективность лечения зависит от своевременности и точности быстрого подбора подходящего противоэпилептического препарата.

Одним из перспективных препаратов, обладающих противоэпилептической активностью, является препарат, влияющий на эндоканнабиноидную систему. Эндоканнабиноиды синтезируются при активации постсинаптических нейронов и ретроградно тормозят выделение медиаторов (обычно глутамата или ГАМК) через пресинаптические метаботропные CB_1-рецепторы. На разных экспериментальных моделях эпилепсии показано, что эндоканнабиноидная система активно участвует в регуляции чувствительности мозга к эпилептической активации [1]. Активность эндоканнабиноидной системы резко меняется при эпилептическом возбуждении: увеличивается синтез эндоканнабиноидов и быстро активируются CB_1-рецепторы, особенно в лимбической системе [1]. Предполагается, что эти процессы направлены на защиту мозга от перевозбуждения.

В данной работе сравниваются характеристики спонтанных абсансных разрядов и абсансных разрядов после введения агониста эндоканнабиноидных рецепторов WIN55,212-2. Абсансные пик-волновые разряды характеризуются тем, что они широко генерализованы по коре, имеют высокую амплитуду, которая в 1,5–2 раза превышает основной ритм ЭЭГ, длительность большинства разрядов составляет более 4 с, основная частота постепенно уменьшается с течением разряда с 11 до 8 Гц. Известно, что в формировании пик-волновых разрядов участвуют структуры кортико-таламического круга, и они являются характерным признаком абсансной эпилепсии.

Хотя само по себе наличие разрядов хорошо диагностируется на ЭЭГ даже просто визуально, а еще лучше – с помощью частотно-временного анализа (спектрограммы или вейвлеты), механизмы возникновения и развития генерализованной эпилепсии в значительной степени скрыты в структуре связей между ответственными за генерацию структурами мозга. Чтобы вскрыть их, требуется использовать различные изощренные подходы, начиная от нелинейной корреляционной функции [2], до подходов, основанных на построении сложных прогностических моделей, как причинность по Грейнджеру [3].

Использование сложных методов часто приводит к ложно положительным результатам, в частности из-за недостаточного временного разрешения или неверного выбора структуры модели и типа аппроксимирующих функций [4]. Поэтому в данной работе использовалась специализированная нелинейная модель, построенная на принципах, изложенных в [5]. Для изучения абсансных разрядов в других экспериментах с крысами линии WAG/Rij такая модель применялась уже в [3].

Цель настоящей работы – исследовать изменения функциональной связности в кортикогиппокампальной сети, вызванные введением агониста эндоканнабиноидных рецепторов WIN55,212-2 крысам с генетической абсансной эпилепсией. В частности, выявить перестройки в сети, могущие предшествовать или соответствовать усилению, ослаблению или качественному изменению эпилептиформной активности; исследовать изменения связанности со временем, сопровождающие инициацию и прекращение приступа в зависимости от того, был ли этот приступ спонтанным или протекал на фоне введения WIN55,212-2.

Данное исследование было выполнено на крысах генетической линии WAG/Rij в Radboud University Nijmegen в Нидерландах, одобрено Европейским сообществом по использованию животных (the European Community for the use of experimental animals), а также утверждено местным комитетом по этике исследований животных (RUDEC 2006-064). Крысы линии WAG/Rij представляют собою хорошо зарекомендовавшую себя генетическую модель абсансной эпилепсии [6]. Соответствие между механизмами абсансной эпилепсии у детей и крыс линии WAG/Rij было неод-

нократно показано, в том числе в последнее время с использованием причинности по Грейнджеру по магнитоэнцефалографическим данным.

В работе были рассмотрены экспериментальные 8-часовые записи сигналов локальных потенциалов мозга двадцати четырех взрослых самцов линии WAG/Rij (от 8 до 10 месяцев). Для анализа всю запись делили на четыре эпохи: 2 часа до введения препарата (эпоха 1), первые 2 часа после введения (эпоха 2), период с 3-го по 4-й часы после введения препарата (эпоха 3), период с 5-го по 6-й часы после введения препарата (эпоха 4). Восемнадцати животным вводился препарат WIN55,212-2 – агонист эндоканнабиноидных рецепторов (шести животным по 3 мг/кг, шести животным по 6 мг/кг, шести по 12 мг/кг), еще шесть животных представляли собою контрольную группу, им вводился растворитель (арахисовое масло подкожно).

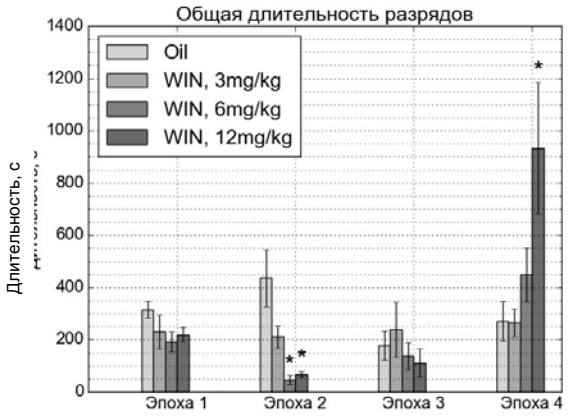


Рис. 1. Статистический анализ: общая длительность разрядов в эпоху. Эпоха 1 – первая эпоха записи до инъекции. Эпоха 2 – вторая эпоха записи, первые 2 часа после инъекции. Эпоха 3 – третья эпоха записи, 3-й и 4-й часы после инъекции. Эпоха 4 – четвертая эпоха записи, 5-й и 6-й часы после инъекции. Высота столбцов – среднее значение, errorbars – среднеквадратичное отклонение, * – статистически значимое отличие. Первые столбцы – результаты по шести крысам с маслом, вторые столбцы – результаты по шести крысам с 3 мг/кг агониста CB_1-рецепторов, третьи столбцы – результаты по шести крысам с 6 мг/кг агониста CB_1-рецепторов, четвертые столбцы – результаты по пяти крысам с 12 мг/кг агониста CB_1-рецепторов

Для совокупности всех разрядов всех животных, которым вводилась выбранная доза препарата (или масло) в выбранную эпоху рассчитывалась средняя длительность разряда и ее среднеквадратичное отклонение (не ошибка среднего). Это среднее соответствует на рис. 1 высоте столбиков, а среднеквадратичный разброс показан планками погрешностей. Если считать, что распределение разрядов близко к нормальному, случай, когда нижняя планка погрешностей для одного случая лежит выше верхней для другого, соответствует случаю, когда эти распределения не пересекаются более чем на 5 %. Это значит, что разряды не только удлиняются в среднем, но и удлиняются почти все. При анализе удлинения разряда в 2–4 эпохи сопоставление дополнительно проводилось не только с животными из того же эксперимента эпохи 1, но и с животными из других экспериментов. Если и при таком сравнении результат оказывался значимым, то можно говорить, что для данной дозы препарата разряды удлиняются настолько, что почти все они длиннее любых разрядов для других животных в 1 эпоху, т. е. эффект препарата столь силен, что можно пренебречь индивидуальными особенностями животных.

Динамика изменений характеристик рядов локальных потенциалов мозга в связи с введением препарата выглядит следующим образом. До введения препарата в коре всех 24 крыс присутствуют разряды «пик – волна», хорошо выраженные в лобной и теменной областях, эпизодически – в затылочной. Это спонтанные разряды, являющиеся следствием генетической предрасположенности крыс линии WAG/Rij к абсансной эпилепсии. Их средняя длительность 7 секунд. Данная характеристика значимо не отличалась во всех четырех экспериментальных группах (рис. 1, эпоха 1).

В первые 2 часа после введения препарата (эпоха 2) по сравнению с результатами до инъекции (эпоха 1) средняя длительность разрядов не меняется (рис. 1, эпоха 2). Но значимо по сравнению с контролем (введение растворителя) и с результатами эпохи 1 уменьшается суммарное время, занятое эпилептиформной активностью для крыс, которым вводили 6 мг/кг и 12 мг/кг препарата. Можно утверждать, что наблюдается снижение эпилептиформной активности абсансного типа.

В третий и четвертый часы после введения препарата (рис. 1, эпоха 3) идет постепенное восстановление эпилептиформной активности абсансного типа. В пятый и шестой часы после инъекции (рис. 1, эпоха 4) происходит усиление эпилептиформной активности абсансного типа. Средняя длительность разрядов значимо увеличивается по сравнению с эпохой 1, причем чем больше доза препарата, тем сильнее возрастает длительность. Суммарное время, занятое эпилептиформной активностью, тоже растет тем сильнее, чем больше была доза. Хотя значения средней длительности разрядов и суммарной длительности эпилептиформной активности для масла и доз в 3 и 6 мг/кг отличаются попарно незначимо, тенденция к увеличению выражена явно и однозначно. Поэтому, если сделать не попарный, а многомерный статистический анализ, эта тенденция оказывается значима на уровне 0,05 как для времени, занятого разрядами, так и для общего числа разрядов в эпохе 3. Для эксперимента с введением 12 мг/кг препарата средняя длительность разрядов и суммарное время эпилептиформной активности статистически значимо выше, чем до инъекции и чем для контрольных крыс. У той особенной крысы, у которой после введения препарата полностью прекратились абсансные разряды, в последние 5 часов записи имели место разряды совершенно другой формы, с другими частотно-временными характеристиками, локализованные преимущественно в области затылочной коры, которые мы не смогли классифицировать. Длительность этих разрядов с каждым часом становилась всё больше.

Анализ связанности структур мозга методом нелинейной адаптированной причинности по Грейнджеру [7] показывает, что для крыс, которым вводили масло, структура связей для всех четырех эпох эксперимента остается постоянной: во время разряда видно четкое увеличение связанности между лобной и теменной корой, а также усиление воздействия со стороны этих двух структур на затылочную кору.

Для крыс, которым вводился препарат, для первой эпохи записи наблюдается такая же структура связи, как для контрольных крыс. В эпохе 2 записи (первые два часа после введения WIN), когда наблюдается подавление судорог (значимо уменьшается суммарное время, занятое эпилептиформной активностью), структура связи не меняется (всё также значимо по сравнению с фоном усиливаются взаимодействия PC↔FC, PC→OC, FC→OC).

В эпохах 3 и 4 записи, когда происходит усиление эпилептогенной активности, структура связей, характерная для всех крыс до введения препаратов, не меняется, просто на графиках воздействия на затылочную долю коры со стороны лобной и теменной долей хорошо видны перезапуски коротких разрядов.

Только при введении 12 мг/кг препарата наблюдается значимое (по сравнению с эпохой 1 записи) усиление воздействия (увеличение PI_{mean}) со стороны затылочной коры на теменную OC→PC в фоне и преиктальном периоде для эпохи 2, во время разряда для эпохи 3 и в постиктальный период для эпохи 3 и 4. Известно, что генерация абсансных разрядов есть результат гиперактивации таламокортикальной системы, в которой образуется колебательный контур, состоящий у крыс линии WAG/Rij из нейронов теменной и, возможно, лобной коры, VPM, RTN, а также в меньшей степени и других ядер таламуса, например постериального [2]. Это было неоднократно показано, а также смоделировано математически [8]. В случае вовлечения большой части нейронов теменной коры в другие контуры таламокортикальный колебательный контур не может образоваться (отсутствие разрядов) или его добротность оказывается мала и колебания в нем быстро затухают (короткие разряды). Более того, нейроны соматосенсорной коры, вовлеченные в другие контуры, в нашем случае это нейроны, находящиеся под интенсивным воздействием затылочной коры и, как следствие, усваивающие частотно-временные характеристики ее колебаний, препятствуют генерации абсансов. Действительно, многие нейроны в соматосенсорной коре тесно связаны, поэтому те из них, которые вовлечены в колебательную активность, инициированную в затылочной коре (или невидимых для нас структурах, с нею тесно связанных, например в энтеринальной коре), будут, воздействуя на клетки, находящиеся в таламокортикальном контуре, десинхронизовывать их (обратное также верно, но не имеет в данном случае существенного значения, поскольку воздействие со стороны затылочной коры оказывается слишком сильным).

Также для этой дозы препарата наблюдается значимое увеличение воздействия со стороны лобной коры на гиппокамп FC→Hp в преиктальный период для эпохи 3 и во время разряда для эпох 2 и 3, что статистически подтверждает результат, который визуально видно на графиках зависимости $PI_{mean}(t)$. Суммируя, можно утверждать, что введение WIN55,212-2 приводит к активизации затылочной доли коры (или структур под ней), а также к увеличению проводимости сигналов к гиппокампу (лимбической системе).

Данная работа была выполнена при поддержке Стипендии Президента РФ для молодых ученых СП-3605.2018.4.

Литература

1. *Wallace M.J. [et al.]*. The endogeneous cannabinoid system regulates seizure frequency and duration in a model of temporal lobe epilepsy // J. Pharmacol. Exp. Ther. 2003 V. 307. P. 129-137.

2. *Lüttjohann A., van Luijtelaar G*. Dynamics of networks during absence seizure's on- and offset in rodents and man // Front. Physiol. 2015. V. 6. Art. 16.

3. *Sysoeva M.V. [et al.]*. Dynamics of directional coupling underlying spike-wave discharges // Neuroscience. 2016. V. 314. P. 75-89.

4. *Kornilov M.V. [et al.]*. Choosing the optimal model parameters for Granger causality in application to time series with main timescale // Chaos, Solitons & Fractals. 2016. V. 82. P. 11-21.

5. *Sysoeva M.V., Sysoev I.V.* Mathematical modelling of encephalogram dynamics during epileptic seizure // Technical Physics Letters. 2012. V. 38(2). P. 151-154.

6. *Russo E. [et al.]*. Upholding WAG/Rij rats as a model of absence epileptogenesis: hidden mechanisms and a new theory on seizure development // Neurosci. Biobehav. Rev. 2016. V. 71. P. 388-408.

7. *Granger C.W.J.* Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods // Econometrica. 1969. V. 37(3). P. 424-438.

8. *Suffczynski P. [et al.]*. Dynamic sofnon-convulsive epileptic phenomena modeled by a bistable neuronal network // Neuroscience. 2004. V. 126. P. 467-484.

Особенности окуломоторной активности у людей, склонных к нарушениям пищевого поведения

Е.Е. Сычева, А.В. Полевая

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В современном мире, согласно статистике, нарушениями пищевого поведения (далее – НПП) чаще всего страдают девушки в возрасте 12–20 лет [1]. При этом для диагностики НПП в основном используются стандартизированные тестовые методики. Однако наличие отношений между респондентом и объектом исследования могут исказить результат теста. Для объективизации процесса диагностики нами предпринимается попытка поиска психофизиологических маркеров, связанных с НПП в пространстве параметров движения глаз при чтении текстов, связанных с тематикой «еда». Айтрекинг представляется перспективной технологией для ранней диагностики НПП, так как особенности когнитивной деятельности в процессе чтения эмоционально-значимых предложений имеют специфические особенности у лиц с НПП [2].

Цель исследования – выявить специфические особенности окуломоторной активности у людей, склонных к нарушениям пищевого поведения.

Материалы и методы

Исследование проводилось в два этапа. Выборку составили добровольцы женского пола в возрасте 18–25 лет (n = 21, mean = 21,2). На первом этапе проводилась оценка пищевого поведения испытуемых с использованием психодиагностической методики «Шкала оценки пищевого поведения» [3]. После первого этапа выборка была разделена на две группы: испытуемые, склонные к НПП (57 %) и условно-здоровые испытуемые (43 %). Второй этап заключался в проведении технологии айтрекинга на установке SMI iView X Hi-Speed 1250 [4]. В качестве стимулов испытуемым предъявлялось 30 фраз разной валентности (10 негативного, 10 позитивного и 10 нейтрального семантического содержания). Негативные предложения представляли собой описание типичных деструктивных когниций относительно приема пищи и образа тела. Позитивные предложения описывали убеждения, свойственные здоровым людям. Предложения нейтральной семантики не содержали описания образов, относящихся к пище и форме тела. Для целей айтрекинга стимулы были уравнены по количеству символов, строк и слов в строках, шрифт Times New Roman, 72 пт. Накопление, корректировка и систематизация исходной информации осуществлялись в электронных таблицах Microsoft Office Excel 2010. Статистическая обработка данных проводилась в программной среде Statistica 10.0. Модель статистического анализа данных включала в себя описательные статистики, корреляционный анализ (критерий Спирмена), кластерный анализ (метод k средних), непараметрические методы анализа достоверности отличий (U – критерий Манна – Уитни).

Результаты и их обсуждение

У испытуемых, склонных к НПП, была выявлена положительная взаимосвязь между уровнем выраженности удовлетворенности своим телом (шкала «Неудовлетворенность телом») и длительностью саккад в процессе чтения позитивных предложений (r = 0,73). Исходя из этого, можем предположить, что чем больше у испытуемого переживаний относительно своего образа тела, тем хуже он воспринимает эмоционально-значимые стимулы. Это предположение полностью согласуется с результатами исследований О.А. Сагалаковой, где изменения саккадической активности были трактованы как объективный маркер дезорганизации целевой деятельности и последующего избегания эмоционально-значимых стимулов у лиц, страдающих аффективными расстройствами [5].

У условно-здоровых испытуемых была выявлена положительная взаимосвязь между уровнем выраженности переживаний относительно своего тела (шкала «Неудовлетворенность телом») и временем первой фиксации на негативном предложении (r = 0,69). Также у этой группы испытуемых была выявлена положительная взаимосвязь между первичным баллом по шкале «Интероцептивная некомпетентность» (методика «Шкала-опросник пищевого поведения») и диаметром зрачка по оси X (r = 0,81) и диаметром зрачка по оси Y (r = 0,81) в процессе чтения негативных предложений. Это позволяет сделать предположение о том, что у испытуемых с наименьшим баллом по этой шкале процесс чтения предложений сопровождается активацией парасимпатического отдела нервной системы, что проявляется в сужении диаметра зрачка [6].

У испытуемых, склонных к НПП, были выявлены положительные взаимосвязи между продолжительностью первой фиксации и продолжительностью фиксаций (r = 0,85), длительностью и амплитудой саккад (r = 0,83); отрицательные взаимосвязи между количеством фиксаций и амплитудой саккад (r = –0,76), продолжительностью фиксаций и амплитудой саккад (r = –0,59) в процессе чтения негативных предложений. Наличие и направленность подобных взаимосвязей позволяет нам сделать предположение о том, что испытуемые читали текст либо очень внимательно, либо крайне поверхностно, что в контексте исследования аффективных расстройств подтверждает предположение о наличии стратегии избегания

негативных стимулов. У условно-здоровых испытуемых такие взаимосвязи отсутствуют, что говорит о нарушении структуры чтения эмоционально-значимых предложений.

На следующем этапе исследования, используя значения исследуемых параметров движений глаз, был проведен кластерный анализ методом *k* средних, где в качестве предиктора выступал факт наличия/отсутствия склонности к НПП. В результате анализа удалось выделить 3 кластера. Кластер 1 содержит 100 % испытуемых из выборки условно-здоровых (9 человек), кластер 2 – 42 % испытуемых из выборки лиц, склонных к НПП (5 человек), кластер 3 – 58 % испытуемых из выборки лиц, склонных к НПП (7 человек).

Было обнаружено, что наиболее достоверно отличаются значения параметров движений глаз у испытуемых, попавших в кластер 1 («условно-здоровые») и в кластер 2 («склонные к НПП»). Наименьший уровень значимости ($p < 0{,}001$) был обнаружен для продолжительности первой фиксации и амплитуды саккад. Таким образом, в результате анализа удалось выделить диапазоны значений специфических параметров движений глаз, отличающие условно-здоровых испытуемых от испытуемых, склонных к НПП.

Далее, используя полученные диапазоны значений продолжительности первой фиксации и амплитуды саккад для кластеров 1 и 2, была проведена повторная дифференциация выборки испытуемых. В результате сравнения полученного распределения испытуемых с исходным распределением, полученным в результате проведения методики «Шкала-опросник пищевого поведения», оказалось, что по значениям кластера 1 соответствие было найдено в 60 % случаев, а по значениям кластера 2 – в 57 % случаев. Следовательно, чтобы определить, к какой группе относится испытуемый, стоит использовать диапазоны значений кластера 1 («условно-здоровые испытуемые»).

Для диапазонов значений продолжительности первой фиксации и амплитуды саккад кластера 1 была рассчитана чувствительность (*S*) и специфичность (*R*).

Было обнаружено, что метод выявляет лиц, склонных к НПП с $S = 0{,}42$ и $R = 0{,}79$, а условно-здоровых лиц с $S = 0{,}85$ и $R = 0{,}52$. Итак, результаты кластерного анализа позволили выделить специфические параметры (продолжительность первой фиксации и амплитуда саккад) и их диапазоны значений, наличие которых поможет выявить принадлежность испытуемого к склонным к НПП или к условно-здоровым людям.

Полученные результаты позволяют говорить об особенностях параметров движения глаз при чтении субъективно-значимой информации, связанных с наличием НПП у женщин. В дальнейшем планируется модифицировать экспериментальную модель, расширить выборку и разнообразить методы статистической обработки для выявления значимых эффектов.

Выводы

1. Структура взаимосвязей параметров окуломоторной активности специфична для валентности текстового стимула.

2. Лица с нарушением пищевого поведения характеризуются более внимательным прочтением текстов о еде вне зависимости от валентности, а также более согласованной динамикой параметров окуломоторной активности, чем лица без нарушений пищевого поведения.

Литература

1. *Fichter M.M., Quadflieg N.* Mortality in eating disorders – results of a large prospective clinical longitudinal study // International Journal of Eating Disorders. 2016. V. 49. P. 391–401.

2. *Kerr-Gaffney J., Harrison A., Tchanturia K.* Eye-tracking research in eating disorders : a systematic review // Int. J. Eat. Disord. 2018. V. 52. P. 1–25.

3. *Ильчик О.А., Сивуха С.В., Скугаревский О.Ф., Суихи С.* Русскоязычная адаптация методики «Шкала оценки пищевого поведения» // Психиатрия, психотерапия и клиническая психология. 2011. № 1. С. 39–50.

4. *Демидов А.А., Жегалло А.В.* Оборудование SMI для регистрации движений глаз: тест-драйв // Экспериментальная психология. 2008. Т. 1, № 1. С. 149–159.

5. *Сагалакова О.А., Труевцев Д.В.* Экспериментальное «eye tracker» исследование искажений внимания при социальной тревоге, осложненной антивитальными переживаниями // Медицинская психология в России. 2017. Т. 9, № 1 (42). С. 1–28.

6. *Bradley M. [et al.]*. The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation // Psychophysiology. 2008. V. 45, № 4. P. 602–607.

Сравнительный анализ характеристик текстовых и игровых задач

А.Г. Тищенко[1], В.В. Апанович[2,3], А.А. Созинов[3], Л.Г. Цхадаиа[1], Ю.И. Александров[2,3]

[1]ГАУГН, Москва; email: wolf1276@yandex.ru
[2]МГППУ, Москва; email: apanovitschvv@yandex.ru
[3]ФГБУН ИП РАН, Москва
email: alesozinov@yandex.ru; e-mail: yuraalexandrov@yandex.ru

Применение в психологических исследованиях специальных методик позволяет давать оценку формированию психологических структур, обеспечивающих поведенческий репертуар (а также динамическое разнообразие способов решения). Такие методики должны соответствовать как формальным критериям, так и конкретно психологическим, при этом их изучение для решения актуальной психологической проблемы должно опираться только на психологическое содержание [5, 6]. Формулировка этой проблемы, поставленной Я.А. Пономарёвым, вводит не только требования к работе с задачами, используемыми в психологических исследованиях, но и к их организации. Изучение процесса решения задач является изучением циклов взаимодействия индивида со средой, или «циклов взаимодействия субъекта с миром» [5], и является возможным при соблюдении методических требований, в частности, критерия «нерегламентируемых способов решения и формирующего эксперимента» [1]. Важно, что в таких играх существует понятие хода, точно соответствующее определению поведенческого акта. Возможность выделять акты допускает применение психофизиологических (электрофизиологических) методов регистрации и необходима для изучения структуры индивидуального опыта [2, 9].

Актуальным является вопрос о возможности выделять поведенческие акты при использовании в исследованиях других задач, например текстовых, мыслительных [3]. На том основании, что исследование – искусственно сформированная область с отобранными по определенным правилам задачами, последовательность задач может рассматриваться как одна предметная область – исследование. Несмотря на то что используемые нами текстовые задачи не соответствуют критерию формирующего эксперимента с контролируемой историей приобретения индивидуального опыта, мы считаем, что их последовательность может описываться в терминах циклов взаимодействия и такие задачи могут быть использованы для диагностирования сформированности психологических структур, а также состояний при переходе к задачам с другой «нормативностью» (правилами и требованиями к решению). Текстовые задачи предлагается сопоставлять с одной из версий игровых методик, с игровыми задачами. Игры представляют собой семейства задач, от одной до нескольких семей, реализованных в игровых уровнях.

Целью настоящей работы является конструирование методической процедуры для возможного применения текстовых задач в исследовании структуры индивидуального опыта. В предыдущих работах (например, [8]) нами были описаны атрибуты задачи и сформулировано ее определение, которое позволяет соблюдать требования для применения задач в психологическом исследовании. Предполагается, что универсальность принципа организации задач обеспечивает возможность их сопоставления в случае принадлежности к разным предметным областям.

Методика

В анализ включили данные участников исследования, выполнивших две серии задач – текстовых и игровых. В качестве текстовых задач использовали сконструированный [3] набор – в анализ вошли 4 группы текстовых задач: «Рыцари и лжецы», «Анаграммы», «Моральные дилеммы», «Соответствие». В качестве игровых задач – вариант игры «Обхват» из методики A-Ware [7]. В игре «Обхват» необходимо обнаружить скрытый объект путем определения неизвестного игроку действия, приводящего к этому результату, и правила, по которому начисляется максимальное количество баллов. Игра содержит 4 уровня, различающихся параметрами сложности. Каждый уровень состоит из проб, в которых могут выделяться следующие события: верное действие, нерезультативное действие и неэффективное действие. В качестве описания таких задач может предлагаться: 1) определить действие, которое приводит к результату; 2) определить точку, которая приводит к результату; 3) определить площадь фигуры, построение которой приводит к результату. В рамках одного уровня положение объекта и его размер не меняются. В таком случае уровень представляет собой задачу. Регистрировали время и точность ответов (текстовые задачи), количество пройденных уровней, количество проб в уровне и события в пробах (игровые задачи).

Проводился анализ динамики этих показателей от задачи к задаче. Для игры – межуровневая динамика, для текстовых задач – динамика внутри групп и ее сопоставление. Проводили разделение участников на группы с высокими и низкими значениями скорости и точности (для текстовых задач в двух вариантах – на основе медианных значений тех, кто решил все четыре задачи, и на основе медианных значений для каждой группы): быстрые правильные (БП), быстрые неправильные (БН), медленные правильные (МП), медленные неправильные (МН). Оценивали изменение этих состояний от задачи к задаче.

Результаты

1. Показатели решения игровых и текстовых задач

Выделены временные пики, соответствующие точкам смены нормативности. Выявлено, что в игре количество эффективных действий увеличивается со временем (см. рис. 1).

Профили решения длинной (расширенной) последовательности задач и короткой последовательности задач по-разному соотносятся с игровым профилем (рис. 2).

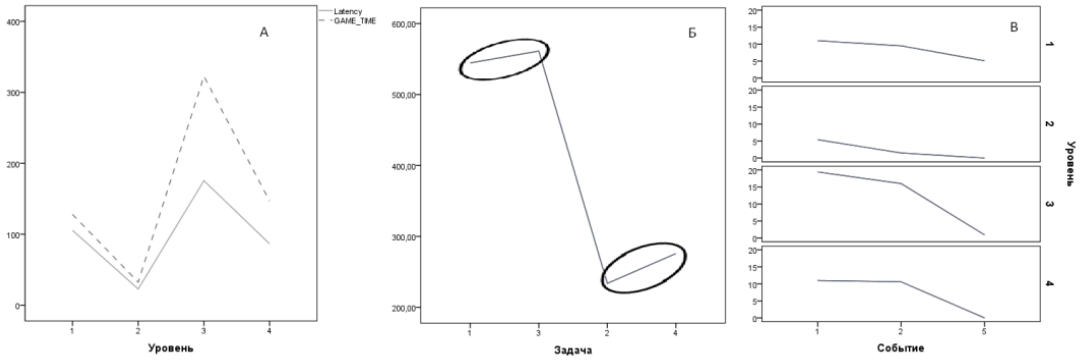


Рис. 1. Скорость завершения этапов игры (А): сплошная линия – латентный период от начала решения до момента успешной реализации; пунктирная линия – время, затраченное на весь уровень; по оси абсцисс – уровни игры, по оси ординат – среднее время. Скорость завершения текстовых задач (Б): по оси абсцисс – группы задач, по оси ординат – среднее время. Последовательность текстовых задач изменена для иллюстрации групп со сходной нормативностью (овалы) и их различия. Количество эффективных и неэффективных проб для каждого уровня игры (В): по оси абсцисс – события в игровой пробе, по оси ординат – среднее время

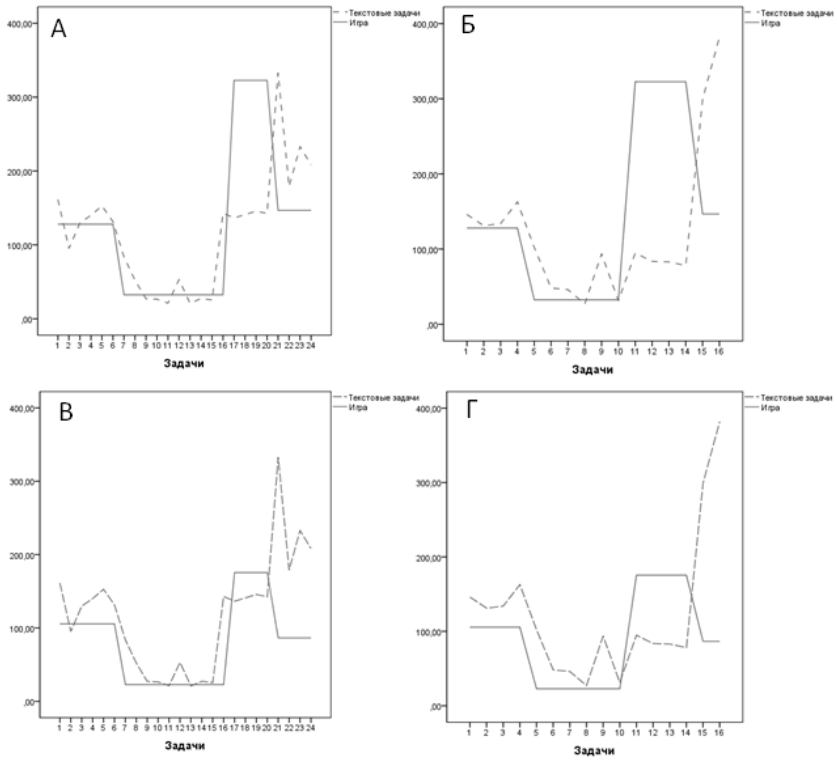


Рис. 2. Профили задач для расширенной (А и В) и сокращенной (Б и Г) последовательности текстовых задач. На графиках А и Б в игровых задачах – время выполнения всей задачи, на графиках В и Г – латентные периоды до первой успешной реализации. По оси абсцисс – номера задач, по оси ординат – время решения. Каждой группе текстовых задач поставлен в соответствие уровень игры. Пунктирной линией показаны профили текстовых задач, сплошной линией – игра

2. Структура текстовых и игровых задач

В ходе анализа *текстовых задач* описали возможное множество шагов и альтернатив, характерных для конкретных групп:

– «Рыцари и лжецы» и «Соответствие» – в качестве альтернатив выступают варианты согласования условий задачи; в качестве шагов выступают итерации выбора – определение анализируемого объекта/ситуации.

– «Анаграммы» – в качестве альтернатив выступают буквосочетания; в качестве шагов выступает выбор начальной буквы (опорной буквы).

– «Моральные дилеммы» – в качестве альтернатив выступают отдельные оценки каждого

выбора; в качестве шагов выступают ситуации оценки.

В этих *игровых задачах* существует такая особенность, как наличие обратной связи (участник исследования знает об успешности/неуспешности своих действий) и последовательных проб решения одной задачи. Шагами в таком случае является возможное количество проб, а альтернативами – тип событий (действие, совершаемое индивидом для определения правила). Ввиду того что для игровых задач определено множество проб для достижения результата, возможно наличие неполных циклов. При анализе динамики показателей решения в игровых и текстовых задачах обнаружено, что существуют состояния, переходы между которыми или невозможны, или крайне редки. Однако выделяются такие состояния, которые образуют «хабы» (hubs) – состояния наиболее стабильные для конкретных уровней/задач. На графиках (рис. 3) представлена динамика показателей решения внутри групп задач и между игровыми уровнями.

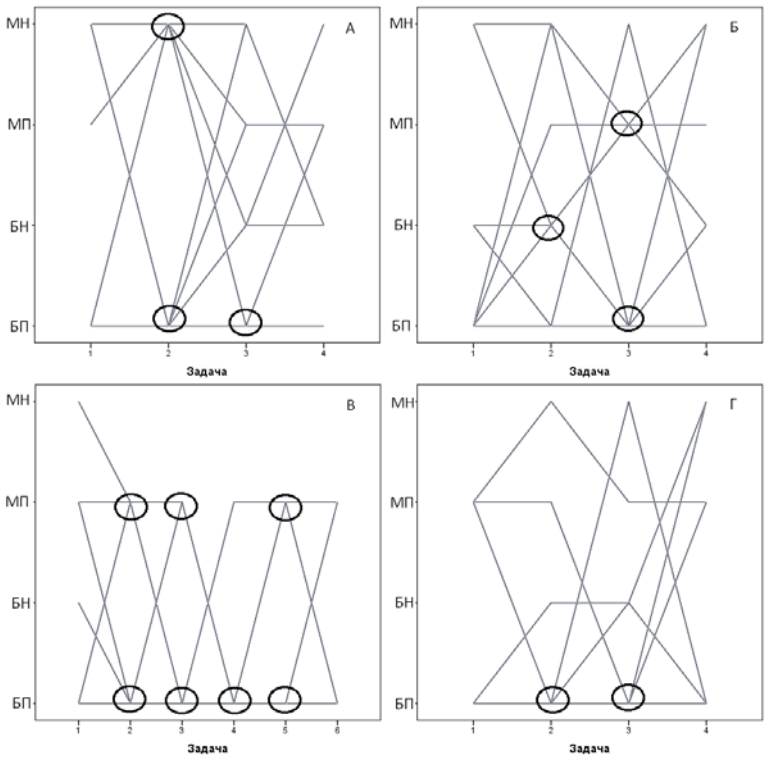


Рис. 3. Задачи: А – игровые; Б – «Рыцари и лжецы»; В – «Анаграммы»; Г – «Моральные дилеммы». По оси абсцисс – номер задачи; по оси ординат – состояния (см. разд. «Методика»). Кругами отмечены вершины с наибольшими весами, т. е. с наибольшим количеством исходящих и входящих ребер

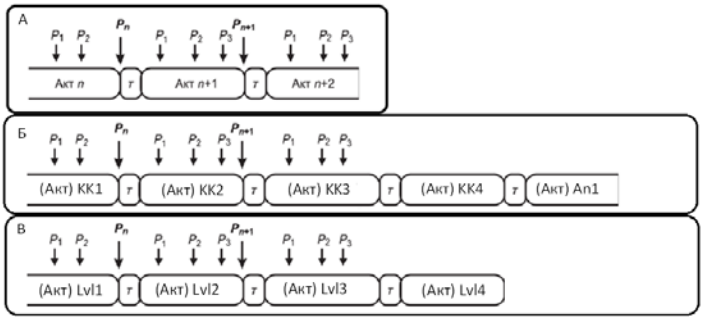


Рис. 4. Поведенческий континуум (А); текстовые задачи (Б); игровые задачи (В): KK – группа «Рыцари и лжецы»; An – группа «Анаграммы»; Lvl – игровой уровень

Предполагаемая модель последовательности поведенческих актов для текстовых и игровых задач в сравнении с поведенческим континуумом представлена на рис. 4.

Обсуждение результатов

В ходе сопоставления показателей решения текстовых и игровых задач получены сходные показатели решения при изменении нормативности. При смене условий задачи увеличивается латентный период до первой успешной реализации, снижается количество неэффективных проб. При расширении последовательности текстовых задач более выраженным становится соответствие профилей с игровыми задачами. Такая общность может позволить ставить в соответствие уровням

игры группы текстовых задач, однако вопрос о сдвиге этого результата при изменении (увеличение или уменьшение) последовательности остается открытым. Актуальной остается проверка состояний с ограничениями на переходы, т. е. таких, при которых репертуар альтернатив может быть оскуднен. Проведенный анализ позволяет вводить такую процедуру при работе с текстовыми задачами и определять основания для соотнесения структуры поведения между задачами разного типа. Такой анализ возможен при анализе как набора идентичных задач, так и набора смешанных задач. Анализ альтернатив и шагов может быть продолжен с возможностью проверить соответствие такой организации задач обучению многозвеньевым навыкам [4]. Сопоставление использованных нами тестовой и игровой методик показывает, что обе методики могут быть расширены. Для игры параметры настроек могут варьироваться таким образом, что количество задач внутри уровня будет больше, а для текстовых задач могут подбираться или конструироваться новые задачи.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант 19-013-00885 А).

Литература

1. *Александров И.О.* Формирование структуры индивидуального знания. М. : Институт психологии РАН, 2006. 560 с.

2. *Александров Ю.И.* Научение и память : традиционный и системный подходы // Журнал высшей нервной деятельности. 2005. Т. 55, № 6. С. 842–860.

3. *Апанович В.В., Тищенко А.Г., Арутюнова К.Р., Знаков В.В., Александров Ю.И.* Критерии различения аналитических и холистических задач // Психология человека как субъекта познания, общения и деятельности / отв. ред. В.В. Знаков, А.Л. Журавлёв. М. : Институт психологии РАН, 2018. С. 924–932.

4. *Кузина Е.А.* Методика обучения крыс многозвеньевым инструментальным навыкам // Процедуры и методы экспериментально-психологических исследований / отв. ред. В.А. Барабанщиков. М. : Институт психологии РАН, 2016. С. 419–426.

5. *Пономарёв Я.А.* Знания, мышление, умственное развитие. М. : Просвещение, 1967.

6. *Пономарёв Я.А.* Перспективы развития психологии творчества // Психология творчества: школа Я.А. Пономарева / под ред. Д.В. Ушакова. М. : Институт психологии РАН, 2006. 624 с. (Научные школы ИП РАН).

7. *Созинов А.А., Бохан А.И., Александров Ю.И.* Методика оценки показателей формирования нового опыта и решения проблем в ситуации приобретения баллов или избегания их потери // Экспериментальная психология. 2018. Т. 11, № 1. С. 75–91 ; doi: 10.17759/exppsy. 2018110105.

8. *Тищенко А.Г., Апанович В.В.* Семантико-синтаксические характеристики текста задачи как мера выделения аналитических и холистических классов задач // Психология человека как субъекта познания, общения и деятельности / отв. ред. В.В. Знаков, А.Л. Журавлёв. М. : Институт психологии РАН, 2018. С. 1112–1118.

9. *Швырков В.Б.* Введение в объективную психологию // Избранные труды. М. : Институт психологии РАН, 2006.

«Образный» Интернет для кругового осмотра музейных статуй

В.В. Ткаченко[1], Г.В. Лосик[1], А.А. Дерюгин[2]

[1]Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск
[2]Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, Минск
email: georgelosik@yahoo.com

В научной школе Е.Н. Соколова (МГУ) разработано новое направление – «векторная психофизиология». Векторный принцип кодирования информации позволяет реализовать в компьютере антропометрический критерий сходства формы двух трехмерных предметов. Поэтому для создания «образного» Интернета нами предложен интегральный критерий: к критерию метрического объективного сходства предметов добавлен критерий сходства карты осмотра одного и того же объемного предмета разными субъектами [1].

Интерфейс пользователя Интернета непрерывно совершенствуется, например разрабатываются принципы поиска образной информации в Сети по картинке, мелодии. Фирмой Google реализован поиск в базе данных информации по двумерной картинке, введенной вместо ключевого слова пользователем в виде запроса. Сегодня на серверах выложено много трехмерных моделей предметов. Разрабатывается метрика сравнения их по форме, текстуре, цвету. Эта метрика оценки сходства трехмерных фигур, сцен, их динамик может быть альтернативна лингвистическому принципу и основываться на антропологическом принципе.

Форма трехмерного предмета при цифровом моделировании задается его поверхностью в 3D-пространстве. Для задач визуализации дополнительно к модели предмета вокруг него в 3D-пространстве задается позиция наблюдателя. Она задается координатами местонахождения наблюдателя, вектором направления взора на предмет и вектором наклона головы наблюдателя.

Предметы материального мира отличаются между собой формой в сильной степени. Но в этом отличии кроется как объективное метрическое их отличие, так и отличие на чисто субъективной основе. Человек различает предметы по форме очень легко [2]. Исследования показывают, что в мозге имеются механизмы не только метрической, но и топологической обработки трехмерных форм и их сравнения [3]. В связи с созданием «образного» Интернета использование этих механизмов становится актуальным. Кодирование «образом» является антропоморфным, так как в метрике компьютерного образа появляется объективная информация о субъективности действий каждого индивида с объектом.

В реальной жизни человек осматривает объект только с реально доступных точек взора. Карта кругового осмотра им нового 3D-объекта зависит от *цели* его деятельности и от *функции* этого объекта в его жизни как субъекта. На основании лишь объективных параметров формы выработать единый «объективный» *критерий* сходства предметов невозможно. При математическом сравнении трехмерных моделей возникает проблема *субъективности математика*, его волеизъявления относительно того, с какой точки в 3D-пространстве смотреть на объект, а с какой не смотреть, какие грани и линейные размеры многоугольников считать важными, а какие не важными. Эту субъективность следует уменьшить. Зрительные ассоциации возникают не только из-за метрического сходства форм двух ассоциированных предметов. Они возникают также из-за сходства субъективного осмотра и взаимодействия человека с данными предметами.

Нами реализована техника измерения «субъективной» компоненты в образе предмета в виде регистрации «карты кругового осмотра» предмета [4].

Была разработана лабораторная модель «образного» Интернета. Она реализована в виде программных модулей для взаимодействия пользователя компьютера, смартфона с сервером. Первый модуль визуализирует на дисплее пользователя объемный виртуальный объект. Второй модуль регистрирует карту кругового осмотра пользователем объекта (рис. 1). Осмотр объекта совершается пользователем при помощи манипулятора «мышь» или жестами пальцев по tach-дисплею. Регистрируется местоположение виртуальной точки взора, удаленность смотрящего от объекта, продолжительность осмотра объекта из данной точки. Третий модуль сегментирует траекторию осмотра на типичные для субъекта «маневры» осмотра, выявляет «любимые» места осмотра этого объекта у данного пользователя, распознает мотив каждого маневра. В итоге совершается накопление в базе сервера данных об антропологическом отношении пользователей к конкретным объектам X_1, X_2, …, X_i их повседневного обихода. Это суть когнитивные карты осмотра объекта X_i.

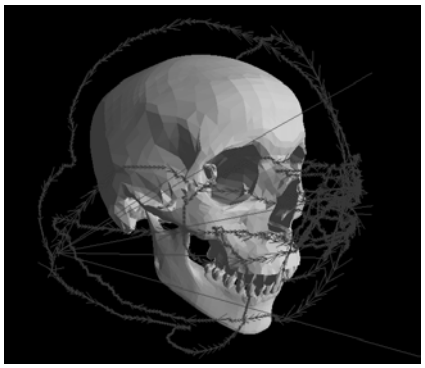


Рис. 1. Геометрический вид карт кругового осмотра одного и того же объекта двумя разными субъектами

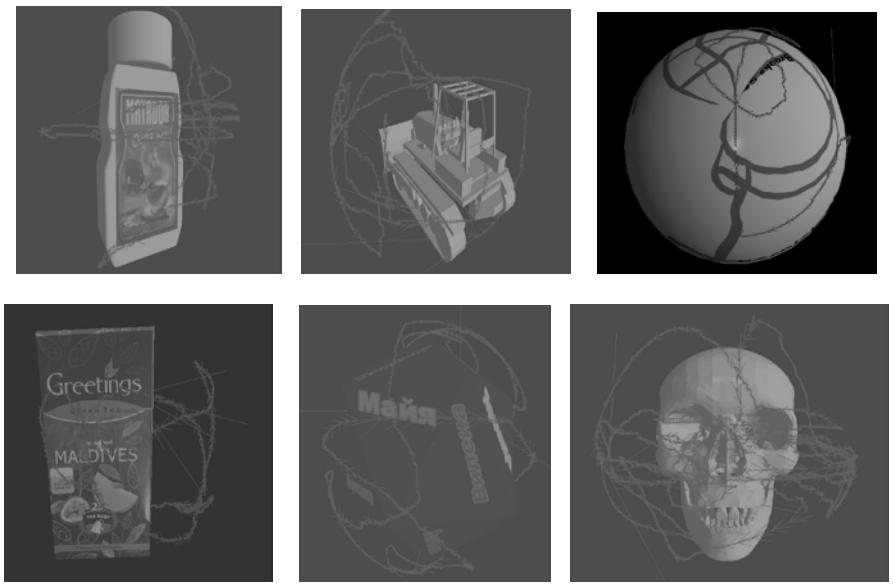


Рис. 2. Геометрический вид карт кругового осмотра одним субъектом шести разных объектов и распознавание однотипности психологического мотива маневров осмотра

В рамках другой когнитивной задачи можно накапливать на сервере данные об отношении конкретного субъекта S_1, S_2, …, S_j к множеству объектов схожего класса. Это суть субъектные карты осмотра (рис. 2).

Литература

1. *Лосик, Г.В.* Проблема создания «образного» Интернета / В.В. Ткаченко, Г.В. Лосик // Материалы Третьей Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». Нижний Новгород, 2013. С. 97-98.

2. *Величковский, Б.М.* Конвергенция сознания и технологический прогресс // В мире науки. 2013. № 4. С. 110-111.

3. *Гончаров, О.А.* Восприятие пространства и перспективные построения. СПб. : СПбГУ, 2007. 213 с.

4. *Иваницкий, Г.А.* Технология определения типа совершаемой в уме мысленной операции по рисунку электроэнцефалограммы / Иваницкий Г.А., Наумов Р.А., Иваницкий А.М. // Технологии живых систем. 2007. Т. 4, № 5/6. С. 20-28.

Конвергентные исследования нейрокогнитивных процессов головного мозга и иммунологического статуса больных шизофренией

В.Л. Ушаков[1,2], И.К. Малашенкова[1,3], Н.В. Захарова[4], М.Г. Шараев[5], А.В. Масленникова[6], Marie Arsalidou[7], А.В. Вартанов[8], Г.Ш. Мамедова[4], С.И. Карташов[1,2], В.А. Орлов[1], Д.Г. Малахов[1], С.А. Крынский[1], Н.А. Хайлов[1], И.М. Енягина[1], Д.П. Огурцов[1,3], А.Ю. Архипов[6], В.Б. Стрелец[6], В.Б. Дорохов[6], А.Г. Сбоев[1], А.А. Селиванов[1], И.А. Молошников[1], Б.М. Величковский[1], Г.П. Костюк[4]

[1]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва
[2]Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
[3]Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины ФМБА России, Москва
[4]ГБУЗ «Психиатрическая клиническая больница № 1 им. Н.А. Алексеева Департамента здравоохранения города Москвы»
[5]Сколковский институт науки и технологий, Москва
[6]Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва
[7]Высшая школа экономики, Москва
[8]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Современное развитие методов неинвазивной нейровизуализации позволяет проводить уникальные исследования в области построения архитектуры крупномасштабных нейросетей головного мозга, принимающих участие в нейрокогнитивных процессах высших психических функций. Результаты исследований нейронаук используются в области практической медицины. Одними из самых актуальных в аспекте социально-экономического значения являются основанные на фундаментальных исследованиях задачи поиска патогенетических путей расстройств шизофренического спектра с целью разработки методов профилактики, ранней диагностики и эффективной терапии. На текущий момент не существует единой общепринятой теории патогенеза шизофрении, при этом социально-экономическое бремя от заболевания огромно, например в 2009 г. оно составило 196,67 млрд. рублей [1]. Непрекращающиеся дискуссии о классификации феноменологических критериев диагностики обусловлены отсутствием экспертных систем комплексной оценки объективных показателей нейроиммунологического статуса, нейрофизиологических коррелятов, показателей психиатрического и неврологического тестирования, результатов биохимического анализа. Многие звенья патогенеза шизофрении остаются неясными. В настоящее время накоплены убедительные данные, которые были получены в клинических исследованиях и подтверждены результатами изучения транскриптомов клеток иммунной системы и постмортального мозга, о наличии у больных шизофренией не только нейровоспаления, но и системного воспаления и активации иммунной системы на периферии [2]. Однако причины их возникновения, место их в патогенетической цепи, роль в сложных взаимосвязях между мозгом с измененной активностью, нейровоспалением и факторами регуляции эндокринной и иммунной систем остаются неясными. Открытыми остаются вопросы о корреляции нейроиммунных изменений и разных клинических форм шизофрении, характера течения заболевания и особенностей ответа на лечение (резистентность к терапии, когнитивные расстройства, когнитивное снижение, хронификация и т. д.).

С фундаментальной точки зрения крайне интересна задача построения архитектур нейросетей головного мозга, обеспечивающих механизмы работы сознания человека в норме и при его нарушении. Прежде всего, речь идет о процессах в головном мозге, принимающих участие в реализации параноидного синдрома при шизофрении, когда можно предположить, что болезненный схизис (расщепление) реализуется вследствие «появления» у человека одновременно двух «личностей» – собственного «я» и доминирующего над сознанием галлюцинаторно-параноидной симптоматики, когда «голос (голоса)», носит императивный характер, а также явления психического автоматизма, как бы управляющего поведением больного. Поиск центров зарождения параноидной симптоматики, изучение нейрофизиологических проявлений галлюцинаторно-бредовых расстройств (диагноз «шизофрения F20.0»), изменения иммунного статуса после перенесенных психозов стали основой настоящей работы. Впервые в России был разработан и апробирован комплексный междисциплинарный поход для изучения многофакторного заболевания шизофрении [3], включающий разные метрики неврологических, биохимических, нейровизуализационных (магнитно-резонансная томография) данных и иммунологических показателей, который представлен в данной работе.

Материал

Клиническую выборку составили 38 больных шизофренией возрастом от 18 до 42 лет (средний возраст (29 ± 2) лет) из числа госпитализированных в стационарные отделения ГБУЗ «ПКБ № 1 им. Н.А. Алексеева ДЗМ» в период с 2017 по 2019 г. с диагнозом «шизофрения F20.0» (галлюцинаторно-параноидная). Критерии исключения: органические заболевания головного мозга, тяжелые соматические заболевания, зависимость от ПАВ. Включение в исследование осуществлялось на стадии редукции острой психотической симпто-

матики и в стадии медикаментозной ремиссии на фоне стандартной антипсихотической терапии. В контрольную группу включено 38 здоровых добровольцев без когнитивных и аффективных расстройств (сопоставимые с пациентами с шизофренией по полу и возрасту). Все участники подписали листок информированного добровольного согласия. Проведение исследования было одобрено локальным этическим комитетом НИЦ «Курчатовский институт».

Методы

а) Клинический метод. Методология исследования подразумевала отбор пациентов со сходными психопатологическими проявлениями и классическим развитием синдрома Кандинского – Клерамбо с отчетливой стадийностью психоза, когда стадии затухания острой симптоматики и формирования ремиссии в обратной хронологии повторяют начальные проявления заболевания. Таким образом, у всех обследованных заболевание дебютировало персекуторным интерпретативным бредом (с различными фабулами), последующим присоединением явлений психического автоматизма, слуховых псевдогаллюцинаций (вплоть до императивных) и парафренизацией бреда на высоте психоза. Включение в исследование подразумевало редукцию психотической симптоматики при наличии отчетливых воспоминаний о психозе и сформированной критике на фоне лечения. Сведения о социодемографических, клинико-динамических и данные психометрических тестирований сведены в единую базу данных, объединяющую около 1000 переменных для каждого пациента.

б) Иммунологический анализ. У всех испытуемых было проанализировано содержание в сыворотке крови уровня цитокинов (IL-6, IL-8, IL-10, IFNγ, TNFα) и антагониста рецептора IL-1β IL-1RA), циркулирующих иммунных комплексов (ЦИК), С-реактивного белка (СРБ), кортизола и иммуноглобулинов (Ig A, M, G), сывороточного уровня нейротрофических факторов в день проведения МРТ-сканирования.

в) Блок нейрофизиологических исследований. Проводимые исследования на основе использования метода магнитно-резонансной томографии на МР-томографе MagnetomVerio 3T (Siemens, Германия, сверхбыстрый протокол функциональной МРТ (фМРТ) был получен из Center for Magnetic Resonance Research, Department of Radiology, University of Minnesota) с использованием 32-канальной головной МР-катушки состояли из трех частей: анализ морфологических параметров головного мозга, анализ проводящих путей головного мозга и функциональное исследование нейросетевой активности головного мозга на основе метода фМРТ, регистрирующего изменение BOLD (blood oxygen level dependent) сигнал. Структурное исследование проводилось с использованием T1-взвешенной последовательности (TR = 1900 мс, TE = 2,21 мс, 176 срезов, размер воксела 1×1×1 мм). По анатомическим зонам определялись морфологические показатели (толщина и объем серого вещества, объем белого вещества, индекс гирификации, объем серого вещества по субкортикальным структурам и др.) для контрольной группы и группы больных.

Анализ проводящих путей головного мозга проводился с использованием матриц структурных связностей и выделение rich-club-районов на основе данных трактографии (diffusion tensor image, DTI) в режиме получения данных B_0 и по 64 векторным направлениям (значение b составляло 1500 с/мм^2) с TE = 101 мс и TR = 13700 мс. Данные были получены для двух направлений фазовых кодирующих градиентов: anterior-posterior и posterior-anterior. Толщина среза составляла 2 мм, разрешение в плоскости томографического среза – 2 мм.

Нейрофизиологические показатели фиксировались с помощью специально сконструированных МРТ-совместимых аппаратов ЭЭГ и полиграфа.

Результаты

Исследование иммунологических показателей на групповом уровне показало у больных шизофренией достоверные изменения гуморального иммунитета, активацию системного воспаления, включая увеличение содержания цитокинов IL-6, IL-8, IFNγ. Важно отметить, что при обследовании 22 больных с параноидной шизофренией (продолжительность заболевания от 3 до 10 лет) через 2–3 недели после начала терапии, несмотря на достигнутое клиническое улучшение, в среднем оставались повышенными уровни маркеров системного воспаления и активации гуморального иммунитета. Уровень СРБ (рис. 1) составлял у больных, обследованных в динамике, (5,6 ± 2,0) мг/л (при (1,7 ± 0,9) мг/л в контрольной группе), кортизола – (479 ± 49) нмоль/л (при (344 ± 65) нмоль/л в контрольной группе), циркулирующих иммунных комплексов – (114 ± 20) у. е. (при (77 ± 11) у. е. в контрольной группе). При этом наиболее выраженными признаки системного воспаления были в подгруппе больных с первым психотическим эпизодом или продолжительностью заболевания до года (n = 16). У этих больных до лечения уровень СРБ в среднем достигал (11,8 ± 7,2) мг/л, кортизола – (660 ± 97) нмоль/л, уровень циркулирующих иммунных комплексов – (82 ± 14) у. е. Через 2–3 недели после терапии (рис. 2) концентрация СРБ в этой группе составила (13,4 ± 6,4) мг/л, кортизола – (589 ± 80) нмоль/л, уровень циркулирующих иммунных комплексов в среднем (96 ± 17) у. е.

Кроме того, у больных шизофренией с анамнезом болезни более 3 лет (средняя продолжительность (8,4 ± 1,3) года) в динамике терапии выявляли более высокое содержание иммуноглобулина М, циркулирующих иммунных комплексов, уровня кортизола и В-лимфоцитов, чем у больных с меньшей продолжительностью заболевания. Данные изменения могут оказывать повреждающее действие на микроциркуляцию, способствовать эндотелиальной и митохондриальной дисфункции, а так-

же отражать аутоиммунную перестройку иммунной системы.

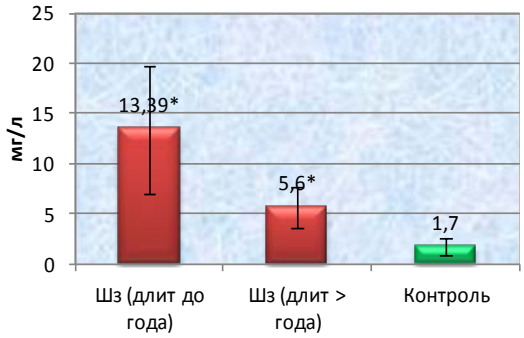


Рис. 1. Уровень С-реактивного белка у больных с шизофренией в зависимости от длительности заболевания. * – достоверные (p < 0,05) различия с контрольной группой

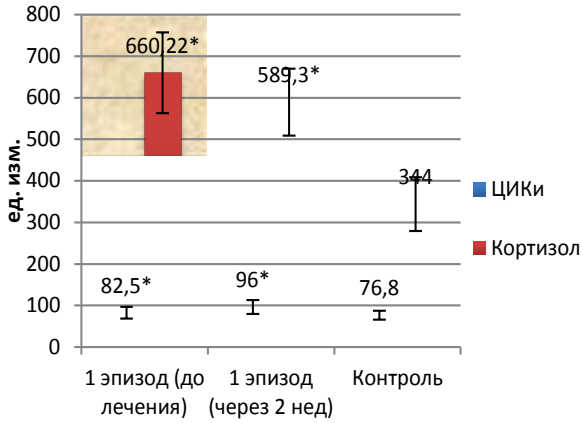


Рис. 2. Динамика уровня циркулирующих иммунных комплексов и кортизола на фоне терапии у больных с 1 психотическим эпизодом. * – достоверные (p < 0,05) различия с контрольной группой

Блок проведенных структурных МРТ-исследований позволил выявить участки головного мозга, отличающиеся по морфологии для группы здорового контроля и больных, определить особенности проводящих путей каждой группы и получить информацию о районах головного мозга, имеющих свойство rich-club-структур [5] – сильно связанных и высокоцентральных областей узлов головного мозга, которые играют ключевую роль в глобальной информационной интеграции между различными частями сети и характеризуются тенденцией к тому, что узлы высокой степени более плотно связаны между собой, чем узлы более низкой степени.

Нейрофизиологическая часть эксперимента состояла из трех исследовательских задач. Во-первых, для исследования нейрональных коррелятов сознания простой и эффективной моделью является сравнение состояний сна и бодрствования. Сознание отключается во время сна и включается при пробуждении. Момент пробуждения от сна является перспективной моделью для исследования нейрофизиологических коррелятов сознания. Нами разработан психомоторный тест, монотонное выполнение которого вызывает в течение 60 минут чередующиеся эпизоды с исчезновением сознания при засыпании («микросон») и его восстановлением при пробуждении (бодрствование). При выполнении этого теста испытуемый с закрытыми глазами считает от 1 до 10 и одновременно нажимает кнопку попеременно правой и левой рукой. Спонтанное восстановление теста после эпизода «микросна» требует активации сознания, которое сопровождается осознанным выполнением теста с устным счетом и одновременным нажатием на кнопку. ЭЭГ-методы позволяют с большой точностью оценивать моменты перехода от сна к бодрствованию, уровни бодрствования и глубины сна, а поведенческие методы – по показателям правильности выполнения психомоторного теста определять уровни сознания. Показана воспроизводимость этого теста в условиях МРТ, получаемых в обычных условиях. У 10 из 14 испытуемых в течение 60-минутного эксперимента, выполняемого в камере МРТ, были зарегистрированы по 3–10 эпизодов «микросна» с последующим пробуждением. На рис. 3 показана механограмма нажатия правой и левой кнопки во время чередования фаз сна и бодрствования (стрелка указывает момент «микросна», красные вертикальные линии указывают моменты пробуждения в соответствии с механограммой).

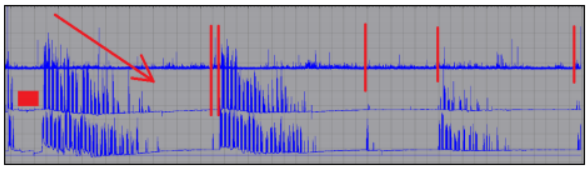


Рис. 3. Механограмма нажатия правой и левой кнопки во время чередования фаз «микросна» и бодрствования

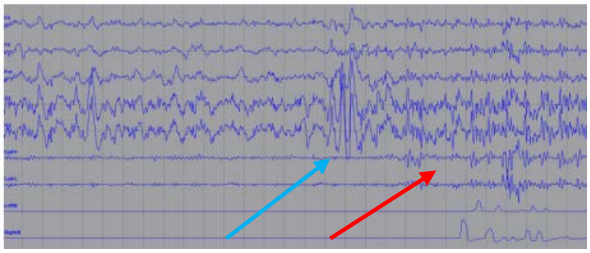


Рис. 4. Пример ЭЭГ момента пробуждения (красная стрелка) с предшествующим К-комплексом (голубая стрелка) и медленноволновой активностью (после коррекции градиентных и кардиобаллистических МРТ-артефактов)

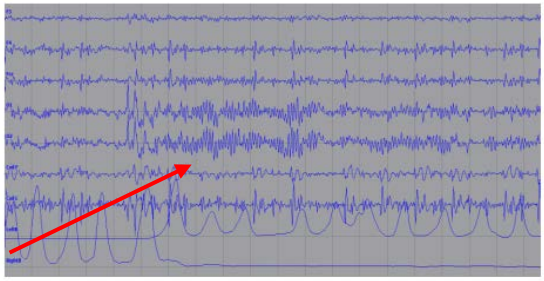


Рис. 5. Альфа-ритм ЭЭГ в состоянии бодрствования (красная стрелка) (после коррекции градиентных и кардиобаллистических МРТ-артефактов)

На рис. 4 дан пример ЭЭГ, записанной синхронно с фМРТ и механограммой (инженерная часть была выполнена Д.Г. Малаховым). Показаны время пробуждения (красная стрелка) и предшествующая медленная активность (синяя стрелка). В этом примере в момент пробуждения испытуемый начинает нажимать кнопки двумя руками одновременно (два нижних канала на рис. 4). Обычно после нескольких нажатий испытуемые вспоминают инструкцию и начинают нажимать кнопки отдельно. На рис. 5 показан пример альфа-активности ЭЭГ испытуемого в состоянии бодрствования.

Данные фМРТ были получены с использованием следующих параметров: 42 среза, TR = 1000 мс, TE = 25 мс, толщина среза = 2 мм, угол поворота 90°, FOV = 192 × 192 мм, Multiband = 8. Предварительные результаты (рис. 6) показали увеличение активности зрительных областей (район шпорной борозды) коры головного мозга, левого прекунеуса/кунеуса и др. во время сна и областей правого таламуса, левого кунеуса, зон мозжечка, стволовых структур и др. в момент пробуждения и возобновления сознательной деятельности.

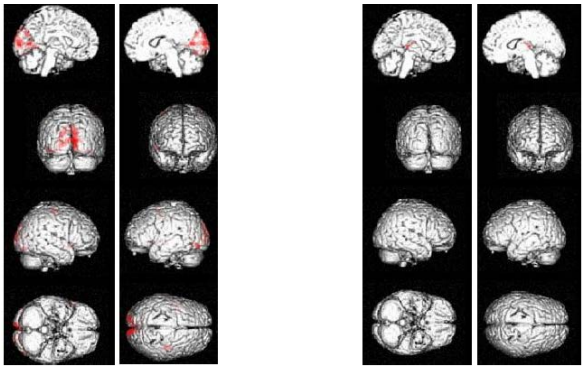


Рис. 6. Локализация по фМРТ-данным нейросетевой активности головного мозга во время сна (левая панель) и в момент пробуждения и возобновления сознательной деятельности (правая панель), ($p < 0{,}05$, FWE)

Во-вторых, было проведено исследование работы нейросетей головного мозга в состоянии покоя (resting state) – базовом уровне сознания. Для получения данных фМРТ были использованы следующие параметры: 30 срезов, TE = 25 мс, толщина среза 3 мм, угол переворота 90°, поле наблюдения 192 × 192 мм. Данные по состоянию покоя записывались для каждого испытуемого, принимающего участие в эксперименте. TR был записан в трех вариантах – 720 мс, 1000 мс, 1100 мс. Время записи состояния покоя составляло 10 мин. Участникам было дано задание в течение всего времени эксперимента лежать спокойно и расслабленно с закрытыми глазами (засыпание контролировалось последующими вербальными ответами и с помощью МР-совместимого полиграфа). При статистической обработке данных восстанавливались функциональные связности работы нейросетей головного мозга на основе корреляции Пирсона ($p = 0{,}05$) и эффективные связи расширенной сети состояния покоя: 1) неокортекса – система DMN (Default Mode Network) – области mPFC (medial prefrontal cortex), PCC (posterior cingulate cortex), LIPC and RIPC (left and right intraparietal cortex); 2) палеокортекса – AMYl and AMYr (left and right amygdalae); 3) архикортекса – LHIP and RHIP (left and right hippocampal formation). Анализ эффективных связей проводился с помощью методов спектрального DCM (Dynamic Causal Modeling) и метода переноса энтропии (TE). Точность прогноза байесовского классификатора на основе выбранных дискриминирующих две группы эффективных связей составляет 65 %, что значимо отличается от случайного выбора. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в состоянии покоя эффективные коннектомы группы здоровых испытуемых и пациентов с шизофренией имеют значимые различия в силах связей: RHIP->AMYl, RHIP->AMYr, LHIP->AMYl, LHIP->AMYr, RIPC->LIPC, AMYr->LHIP, AMYr->RHIP. Эти различия позволяют предсказывать отношение нового испытуемого к одной из групп (ставить диагноз) хоть и с невысокой точностью, но значимо отличной от случайного угадывания. В дальнейшем планируется провести анализ эффективных коннектомов, полученных в фМРТ со специально подобранными задачами, которые должны подчеркнуть различия в исследуемых группах. Также стоит подчеркнуть, что основные найденные различия между группами заключаются в связях между билатеральными парагиппокампальными извилинами (входящими в так называемую расширенную дефолтную сеть) и билатеральными миндалинами. В пределах самой дефолтной сети значимо отличается только одна связь – RIPC->LIPC.

В-третьих, самой важной частью проводимых исследований было определение нейросетей головного мозга, которые могут принимать участие в процессах реализации личности – собственного «я» и голоса (голосов), который комментирует или управляет поведением больного с галюцинаторно-бредовым синдромом. Подбор эмоциональных стимулов для эксперимента осуществлялся согласно анамнезу больного, они были индивидуальны и специфично связаны с заболеванием. Еще В.М. Бехтерев говорил [6, 7], что если хочется посмотреть нейросети, работа которых у больного нарушена, то нужно предъявлять адекватный стимул, который связан с этим повреждением. Поэтому, если мотив галлюцинаторно-бредового состояния по анамнезу был связан с религиозной тематикой, предъявлялись религиозные стимулы, если он был связан с наукой (например, изучение фракталов), то были выбраны стимулы из нелинейной математики и физики. Выбранные стимулы в виде картинок или слов оценивались самими испытуемыми, которые их ассоциативно описывали и сравнивали друг с другом по эмоциональной шкале в ходе предварительного психологического тестирования. По ответам испытуемого методом многомерного шкалирования строилось его когнитивно-психологическое пространство, где все выбранные стимулы (личностно-значимые и нейтральные) можно было отнести к той или иной группе. Выбранные личностно-значимые для кон-

кретного больного стимулы в визуальной или аудиостимуляции предъявлялись ему в ходе фМРТ-экспериментов (TR = 2000 мс, размер вокселя 2×2×2 мм). Для каждого больного был свой контрольный испытуемый из группы нормы, которому предъявлялись те же самые стимулы. В фМРТ-эксперименте использовалась блоковая парадигма:

1) при предъявлении визуальных стимулов было три блока предъявления, каждый продолжительностью 120 с, состоящих из 30 с предъявления личностно-значимых стимулов (10 стимулов по 3 с предъявления каждого), 30 с покоя, 30 с предъявления нейтральных стимулов (10 стимулов по 3 с предъявления каждого), 30 с покоя;

2) при предъявлении аудиостимулов было четыре блока предъявления, каждый продолжительностью 80 с, состоящих из 20 с предъявления личностно-значимых стимулов (10 стимулов), 20 с покоя, 20 с предъявления нейтральных стимулов (10 стимулов), 20 с покоя. Было выполнено две разных сессии предъявления аудиостимулов – в одной записанные мужским голосом, во второй женским.

Полученные результаты на основе проведенного межгруппового (группа больных по отношению к здоровому контролю) статистического анализа ($p < 0{,}001$) показали различия в работе нейросетей в условии сравнения восприятия личностно-значимых стимулов относительно нейтральных в областях:

для визуальных стимулов – Frontal_Mid_2_R, Postcentral_L, Lingual_R, Putamen_L, Vermis_6;

для аудиостимулов с мужским голосом – Thalamus_L, Frontal_Sup_Medial_R, Occipital_Mid_R, Cerebelum_4_5_L, Temporal_Mid_L;

для аудиостимулов с женским голосом – Frontal_Inf_Tri_L, Frontal_Inf_Orb_2_R, Frontal_Inf_Tri_R, Temporal_Mid_R, Temporal_Sup_L, Cingulate_Ant_R, Thalamus_R, Cuneus_L.

Для контроля предъявления визуальных стимулов в МРТ-экспериментах использовался МР-совместимый айтрекер, а для получения информации об объективности выбора личностно-значимых стимулов был использован метод МР-совместимой полиграфии [8] (инженерную разработку сделал Д.Г. Малахов). МР-совместимый полиграф (МРТсП) имеет возможность во время МРТ-сканирования проводить параллельно регистрацию кожно-гальванической реакции (КГР), дыхания (пневмограмма) и фотоплетизмограммы (ФПГ, с расчетом частоты сердечных сокращений ЧСС), т. е. характеристик физиологических реакций, которые отражают эмоциональное напряжение, в том числе связанное с реакцией на предъявляемые стимулы. Для осуществления установочной серии экспериментов из арсенала криминалистических тестов был заимствован так называемый тест со скрываемым именем (далее – ТСИ), в ходе которого испытуемый скрывал от полиграфолога свое имя, предъявляемое в ряду с пятью другими именами; ряд имен предъявлялся испытуемому в ходе теста пять раз. За исключением одного имени, стоявшего под номером 0, все остальные предъявлялись в случайном, неизвестном испытуемому порядке с формулировкой «Вас по паспорту зовут…». Имена задавались экспериментатором с интервалом около 20 сек. с обязательным учетом текущей динамики вегетативных реакций испытуемого, регистрируемых МРТсП. Уже на предварительном этапе индивидуальные вегетативные реакции разделили испытуемых внутри групп больных шизофренией и группы контроля на два типа с высокореактивными (рис. 7) и низкореактивными реакциями (рис. 8) [9].

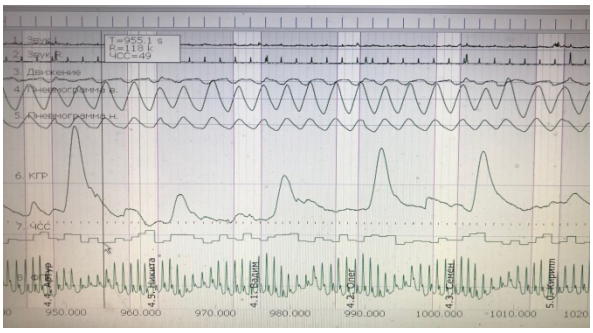


Рис. 7. Пример записи данных МР-совместимого полиграфа у испытуемого с выраженными вегетативными реакциями в условии сокрытия значимой информации. На полиграмме представлено четвертое (из пяти) предъявление ТСИ. Сокрытие значимой информации (собственного имени – Артур) вызывает у испытуемого максимальную КГР (канал 6), а также выраженное падение ЧСС (канал 7; перемещающаяся «линза» показывает 49 уд./мин) и сужение сосудов пальцев руки (канал 8)

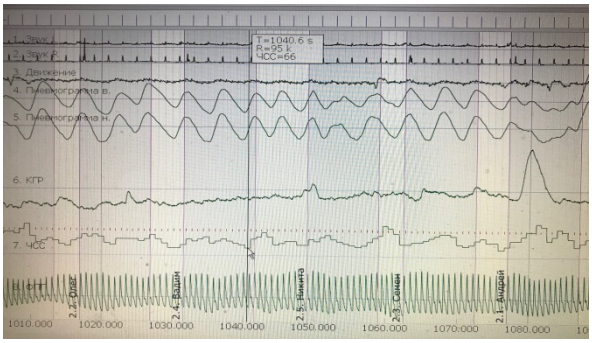


Рис. 8. Пример записи данных МР-совместимого полиграфа у испытуемого с выраженными вегетативными реакциями в условии сокрытия значимой информации. На полиграмме представлено второе (из пяти) предъявление ТСИ. Сокрытие значимой информации (собственного имени – Вадим) не вызывает у испытуемого КГР (канал 6) и сужения сосудов пальцев руки (канал 8), и сопровождается только падением ЧСС (канал 7; перемещающаяся «линза» показывает 66 уд./мин)

На рис. 9 приведен пример записи данных МР-совместимого полиграфа у больного шизофренией в условии аудиопредъявления мужским голосом личностно-значимой информации, отобранной в результате психологического тестирования, описанного выше.

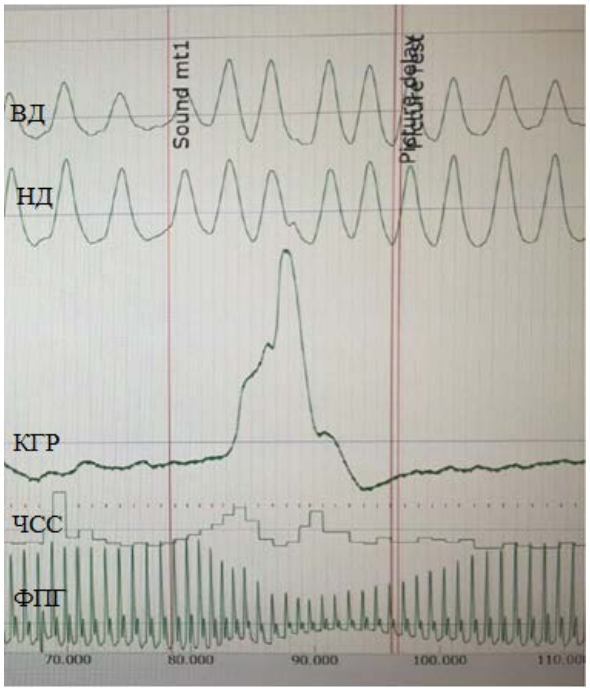


Рис. 9. Пример записи данных МР-совместимого полиграфа у испытуемого в условии аудиопредъявления мужским голосом личностно-значимой информации. Полиграмма физиологических процессов, регистрируемых с помощью МРТсП: ВД – канал верхнего дыхания, НД – канал нижнего дыхания, КГР – кожно-гальваническая реакция, ФПГ – фотоплетизмограмма, ЧСС – частота сердечных сокращений. Предъявление личностно-значимой информации осуществлялось в промежуток времени между красными линиями.

Полученные результаты методом МР-совместимой полиграфии дают основание полагать, что: 1) визуальная стимуляция, по-видимому, оказывается в условиях данного исследования более эффективной по сравнению со словесной; 2) повтор стимулов разными дикторами в категориях «женский или мужской голос» приводит, вероятно, к адаптации испытуемых к этим стимулам и, как следствие, к снижению субъективной значимости для испытуемых предъявляемых им слов (т. е. стимулов). Эти и другие наблюдения, сделанные в ходе анализа результатов экспериментов с контрольной и диагностической группами, указали на необходимость внесения изменений в организацию методики экспериментального исследования на базе метода МРТсП.

Экспериментальная методика была изменена и проведены фМРТ-исследования с предъявлением испытуемым словосочетаний, выбранных из анамнеза, которые произносил испытуемый при госпитализации или в ходе последующего лечения, когда описывал свое состояние. Данные стимулы были разделены на две группы – 13 словосочетаний, отнесенных к значимому бреду отношения и преследования (ЗБОП) и 13 словосочетаний, отнесенных к значимому парафренному бреду (ЗПБ). К каждой группе были подобраны по 13 нейтральных словосочетаний. Время между предъявлениями каждого стимула было около 20 с. Стимулы предъявлялись в случайном порядке. Для регистрации BOLD-сигнала во время просмотра визуальных стимулов использовалась эхопланарная последовательность (TR = 1100 мс, Multiband 3, размер воксела 2×2×2 мм). Полученные предварительные результаты показали, что применение выбранных индивидуальных стимулов и объединение фМРТ-исследований с данными МРТсП дает возможность получить корректную оценку активности нейронных структур, определить конкретные зоны мозга, вовлеченные в процесс работы с личностно-значимой для испытуемого информацией (собственное имя, эмоционально-значимые стимулы, отобранные психофизиологическим тестированием из анамнеза) и обнаружить (с помощью МРТсП) различную динамику реагирования отдельных зон мозга, обусловленную индивидуальными психофизиологическими особенностями испытуемого.

Представленный конвергентный подход к исследованию шизофрении, объединившему специалистов из разных областей – нейрофизиологов, биофизиков, психофизиологов, математиков, генетиков, иммунологов, психиатров, неврологов и т. д., будет развиваться, и на следующих этапах ставится задача классификации форм заболевания на основе многофакторной статистики индивидуальных данных.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта ОФИм № 17-29-02518 (нейроиммунологический статус и особенности базовых когнитивно-эффективных архитектур головного мозга в норме и у больных шизофренией) и гранта 18-29-23020 мк (разработка методов анализа нейрофизиологических данных).

Литература

1. *Любов, Е.Б. [и др.]*. Экономическое бремя шизофрении в России // Социальная и клиническая психиатрия. 2012. 22(3). С. 36-42.

2. *Малашенкова, И.К. [и др.]*. Роль иммунной системы в патогенезе шизофрении // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2018. 118 (12). С. 72-80.

3. *Howes, O.D. [et al.]*. Inflammation and the neural diathesis-stress hypothesis of schizophrenia: a reconceptualization // Transl. Psychiatry. 2017. 7(2). P. 1024.

4. *Ushakov, V.L. [et al.]*. Research of neurocognitive mechanisms of revealing of the information concealing by the person // Proceedings of the BICA 2018. 2018. Vol. 848. P. 310-315.

5. *Van den Heuvel, M.P. [et al.]*. Rich-club organization of the human connectome // Journal of Neuroscience. 2011. 31(44). P. 15775-15786.

6. *Бехтерев, В.М.* Мозг: структура, функция, патология, психика: в 2 т. 1994.

7. *Бехтерев, В.М.* Будущее психиатрии. Наука, 1997.

8. *Kovalchuk, M.V. [et al.]*. Functional magnetic resonance imaging augmented with polygraph: new capabilities // BICA-2019. 2019. P. 260-265. (Advances in Intelligent Systems and Computing ; vol. 948).

9. *Orlov, V.A. [et al.]*. Application of registration of human vegetative reactions in the process of functional magnetic resonance imaging // BICA-2019. 2019. P. 393-399. (Advances in Intelligent Systems and Computing ; vol. 948).

Модели эвристической работы мозга

О.Е. Филатова[1], В.В. Еськов[1], Д.Ю. Филатова[2], Ю.В. Башкатова[1]

[1]Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Сургут
[2]БУ ВО ХМАО-Югры «Сургутский государственный университет»

Развитие кибернетики привело к созданию системного синтеза, т. е. отысканию параметров порядка. В медицине и биологии в этом случае мы говорим о нахождении главных диагностических признаков, которые могут описывать состояние организма человека. Подчеркнем, что такая проблема в биомедицине сейчас не имеет формальных решений. В условиях большой неопределенности решение этой проблемы невозможно в рамках детерминистской и стохастической ДСН [1, 3, 6, 7, 9].

Подчеркнем, что это действительно не решаемая в рамках ДСН проблема из-за доказательного сейчас эффекта Еськова – Зинченко (ЭЗ) [1, 2, 9, 10]. В рамках этого ЭЗ строго доказано, что любая выборка любого параметра x_i, описываемого вектором состояния $x = x(t) = (x_1, x_2, \ldots, x_m)^T$, является уникальной. Эта выборка (ее статистические функции $f(x)$, спектральные плотности сигнала (СПС), автокорреляции $A(t)$ не могут быть произвольно повторены 2 раза подряд. В рамках ЭЗ мы доказали отсутствие статистической устойчивости выборок x_i. Поэтому любые статистические выборки не могут быть произвольно повторены и не имеют информационного значения (они разные, уникальные) [1–3, 6, 7, 9].

В этой связи любые методы ДСН бесполезно использовать для описания функциональных систем организма (ФСО), нейросетей мозга (НСМ) и других биологических систем. Из-за уникальности $x_i(t)$ для ФСО и НСМ мы не можем находить параметры порядка в рамках ДСН, так как любая реализация (нахождение главных признаков – параметров порядка) в рамках ДСН будет разовой, уникальной. Для системного синтеза необходимы другие методы, подходы и другая наука, которая базируется на новой теории хаоса-самоорганизации (ТХС) [1–3, 6, 7, 10].

Из-за отсутствия статистической устойчивости выборок x_i, описывающих параметры организма, мы сейчас предлагаем другие методы и модель. Они основываются на расчетах параметров квазиаттракторов (или лучше говорить о псевдоаттракторах – ПА) и использовании искусственных нейросетей в особых режимах их функционирования. На последнем мы и остановимся в рамках настоящего сообщения [1–3, 4, 6, 7].

Подчеркнем, что в рамках ЭЗ было доказано, что нейросети мозга (НСМ) работают в двух особых режимах. Во-первых, ЭЗ доказывает отсутствие статистической устойчивости выборок электроэнцефалограмм (ЭЭГ), которые получены от одного и того же испытуемого в режиме многократных повторений регистрации ЭЭГ (с одной и той же точки мозга). Это доказывает непрерывный статистический хаос параметров ЭЭГ. Во-вторых, любые параметры $x(t)$ ЭЭГ показывают непрерывное изменение, т. е. непрерывно $dx/dt \neq 0$, отсутствуют стационарные режимы НСМ, нет точек покоя.

Непрерывный хаос и реверберации НСМ можно перенести на работу искусственных нейросетей (НЭВМ) [1–3, 6]. В этом случае при решении задачи бинарной классификации мы можем на каждой итерации (настройки НЭВМ для разделения выборок) задавать начальные веса W_{i0} диагностических признаков x_i хаотично. В этом случае $W_{i0} \in (0, 1)$, но выбор этого W_{i0} производится на этом интервале хаотично (из равномерного распределения).

Число таких повторов N настройки НЭВМ должно быть большим (обычно $N \geq 1000$), и тогда после этих N итераций мы получаем свое особое разделение конечных весов W_i диагностических признаков x_i. Как оказалось, такая процедура с НЭВМ (хаос и реверберация) приводит нас к решению задачи системного синтеза. В этом случае мы получаем различные веса W_i для всех диагностических признаков x_i, и их можно ранжировать. Те x_i, которые имеют $W_i \geq 0{,}5$, можно считать главными диагностическими признаками – параметрами порядка.

Отметим, что сейчас задача системного синтеза (нахождение параметров порядка) в математике в общем случае не формализована. Нахождение же этих x_i^* (параметров порядка) в рамках стохастики вообще невозможно из-за ЭЗ, т. е. статистической неустойчивости выборок. Любая выборка x_i является уникальной, и мы не можем использовать статистику для выявления различий в состоянии гомеостаза, любых функциональных систем организма (ФСО) или НСМ.

Статистика не работает для целей выявления различий в состоянии, ФСО или НСМ, а использовать другие методы тоже затруднительно. Подчеркнем, что это касается как выборок отдельной группы индивидуумов, так и одного индивидуума, но в режиме многих повторений регистраций одних и тех же параметров ФСО или НСМ. Любая выборка x_i будет уникальной (статистически неповторимой), и статистику сложно использовать для идентификации ФСО и НСМ [1–4, 6, 7].

В связи с ЭЗ мы доказываем, что задачу идентификации главных диагностических признаков x_i^* (параметров порядка x_i^*) в рамках стохастики невозможно решить (выборки непрерывно статистически изменяются). Поэтому мы сейчас предлагаем использовать для этих целей (в системном синтезе) искусственные нейросети (НЭВМ) в режиме хаоса и многократных ревербе-

раций ($N \geq 1000$). Такой режим работы НЭВМ приближает эти нейросети к работе реальных НСМ, т. е. к работе талантливого человека (при максимуме неопределенности).

Фактически, мы сейчас говорим об эвристической работе мозга, когда талантливый человек многократно пытается решить одну и ту же задачу. При этом каждая такая попытка решения (итерации) происходит в режиме хаоса (нового задания условий, $W_{i0} \in (0, 1)$ хаотично) и многократных повторений (реверберацій НСМ). Так работает мозг гениального человека (многократные попытки-реверберации, и любая попытка – это новые условия).

Там, где система работает по старым трафаретам, где нет хаоса начальных состояний, – там нет эвристики и все повторяется однообразно. Гений создает новые модели и новую теорию, работая в режиме хаоса (своих параметров) и многократных реверберацій (повторений) – попыток решения сложной проблемы. В таких режимах (хаос и реверберации) мы находим правильные решения проблемы там, где обычный человек не может их найти. Заставив НЭВМ работать в этих особых режимах, мы находим решения в неопределенности 1-го типа [1–3, 6, 8].

Напомним, что неопределенность 1-го типа является антиподом неопределенности 2-го типа, когда биосистема не изменяется, а статистика показывает непрерывные изменения. При 1-м типе неопределенности мы имеем статистическую неизменность биосистемы, а реально она изменяется. Используя НЭВМ в режиме хаоса и реверберацій, мы не только разделяем состояния ФСО или НСМ, но и находим параметры порядка, т. е. главные диагностические признаки.

В качестве примера такой работы НЭВМ представим разделение параметров сердечно-сосудистой системы школьников, которых перевезли с севера РФ (г. Сургут) на юг РФ (г. Туапсе) с целью лечения и в рамках проведения оздоровительных мероприятий [5]. На рис. 1 представлены результаты 50 повторов настройки НЭВМ (в режиме хаоса W_{i0}) [8].

Для регистрации 6 параметров ССС использовался пульсоксиметр «Элокс-01С» (производство г. Самара, ЗАО ИМЦ «Новые приборы»). При этом регистрировалось не менее 300 точек (за 5 минут мониторинга ССС) следующих параметров: x_1 – SIM – показатель активности симпатического отдела вегетативной нервной системы (ВНС), у. е.; x_2 – PAR – показатель активности парасимпатического отдела ВНС, у. е.; x_3 – SSS – число ударов сердца в минуту; x_4 – SDNN – стандарт отклонения измеряемых кардиоинтервалов (КИ), мс; x_5 – INB – индекс напряжения (по Р.М. Баевскому); x_6 – SpO_2 – уровень оксигенации крови (уровень оксигемоглобина). Параметры x_i ($m = 6$) интегративно представляли состояния ССС и регуляцию ССС со стороны ВНС для каждого испытуемого из группы 15 человек. Далее, выборки сравнивались статистически попарно: состояние (1) – до отъезда из Сургута в санаторий (г. Туапсе); состояние (2) – по приезде из Сургута в санаторий; состояние (3) – при отъезде из санатория в Сургут; состояние (4) – по возвращении в Сургут (после отдыха и оздоровления).

На рис. 1 представлена гистограмма значений каждого веса после 50 итераций. Очевидно, что признаки x_1 – SIM; x_5 – INB; x_6 – SpO_2 имеют наибольшие значения. Многие x_{5i}, где i – номер итераций ($i = 1, 2, \ldots, 50$), принимают значение 1 (т. е. имеют максимум на интервале (0, 1), а для x_6 17 w_i имеют максимум 1). Для 3-го признака x_1 мы имеем всего 7 таких максимальных значений ($w_i = 1$).

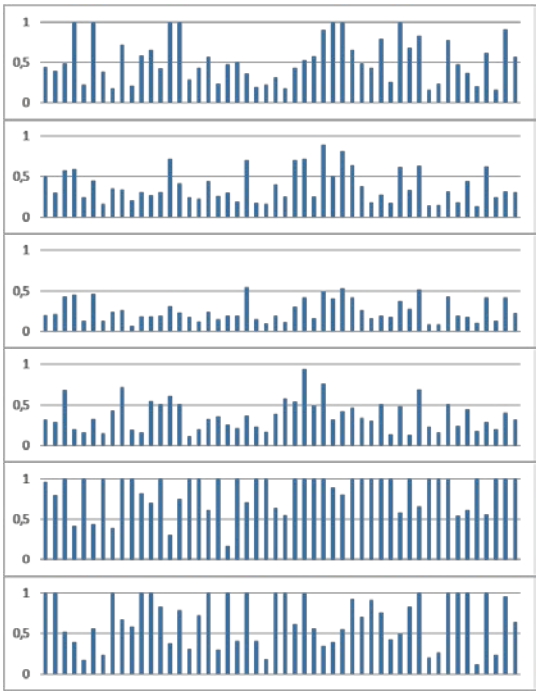


Рис. 1. Диаграмма распределения весов w_i признаков x_i при сравнении состояния ССС девочек в 1-м и 2-м измерениях для каждого j-го обучения (метод градиентного спуска) искусственной нейронной сети ($j = 1, ..., 50$) при хаотическом начальном «встряхивании», т. е. $w_{i0} \in (0, 1)$ из равномерного распределения

Статистическая обработка гистограмм приводит нас к таблице, где представлены средние значения $\langle w_i \rangle$ для всех 6 диагностических признаков x_i. Легко видеть, что при сравнении 1-го широтного перемещения (состояние (1)→(2)) у нас сразу три x_i становятся параметрами порядка (главными диагностическими признаками x_i^*). На 1-м месте находится индекс Баевского x_5 – INB, для которого средний весовой коэффициент $\langle w_5 \rangle = 0{,}84$. Это наибольшее значение, так как 2-й параметр порядка (уровень оксигенации крови x_6 – SPO_2) имеет уже среднее значение $\langle w_6 \rangle = 0{,}67$.

Третий параметр, для которого среднее значение $\langle w_1 \rangle = 0{,}53$, т. е. больше чем 0,5, находится около 0,5. Остальные x_i имеют $w_i < 0{,}5$ и могут быть опущены (их можно не принимать во внимание) при оценке влияния изменения широтного перемещения (1)→(2) на параметры ССС учащихся. Совсем иная ситуация получается при переезде (3)→(4) этой же группы девочек.

Действительно, в таблице мы имеем абсолютного фаворита процедуры ранжирования в виде x_1 – SIM (ранее он был на третьем месте), для которого $<w_1>$ = 0,98. Отметим, что мы имеем также для x_1 существенные статистические различия при сравнении (3)→(4). Критерии Вилкоксона равен P_{34} = 0,02, т. е. это значимый признак и в статистике. Однако x_3 – SSS имел P_{34} = 0,02, а в НЭВМ он не является параметром порядка, его $<w_3>$ = = 0,34. Наоборот, x_4 – SDNN в статистике имел P_{34} = 0,11, но сейчас он занимает 2-е место при ранжировании признаков x_1, его $<w_4>$ = 0,5.

Расчет весовых w_i
для шести признаков параметров x_i ССС школьниц
при широтных перемещениях
в режиме многих итераций ($n \leq 50$)

Расчеты итераций по выборкам ($N \geq 50$)	Веса w_i признаков x_i после N = 50 итераций НЭВМ					
N = 50 j = (1, …, 50)	x_1 SIM	x_2 PAR	x_3 SSS	x_4 SDNN	x_5 INB	x_6 SPO_2
1 и 2	0,53	0,38	0,26	0,37	0,84	0,67
3 и 4	0,98	0,34	0,34	0,50	0,46	0,29

Таким образом, при применении НЭВМ для оценки широтных перемещений (3)→(4) мы выявили 2 параметра порядка (x_1 и x_4), а остальные признаки не имеют большой диагностической ценности. Применение НЭВМ резко разделило состояния (3)→(4) и (1)→(2), выявив 3 параметра порядка (x_5, x_6 и x_1), и показало различие диагностических признаков как в состояниях (1)→(2), так и в состояниях (3)→(4) при сравнении со стохастикой. В первом случае, (1)→(2), стохастика по всем x_i не дает статистических различий, наблюдается неопределенность 1-го типа. Во втором случае, (3)→(4), мы имеем некоторое статистическое различие, но НЭВМ показывает вклад всех 6 диагностических признаков и выявляет 2 параметра порядка (x_1 и x_4).

Литература

1. *Зинченко Ю.П., Еськов В.М., Григорьева С.В., Майстренко В.И.* Нейрокомпьютерные модели эвристической деятельности мозга человека // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. 2018. № 3. С. 109–127.

2. *Киричук В.Ф., Филатов М.А., Григорьева С.В., Мельникова Е.Г., Тагирова Е.Д.* Квантово-механический подход в изучении сознания // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2019. № 1. С. 5–15.

3. *Пятин В.Ф., Еськов В.В., Иванова Н.В., Хакимова В.В., Тагирова Е.Д.* Работа нейросетей мозга и их моделей в режиме системного синтеза // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2019. № 1. С. 88–95.

4. *Eskov V.M., Filatova O.E., Provorova O.V., Khimikova O.I.* Neural emulators in identification of order parameters in human ecology // Human Ecology. 2015. № 5. P. 57–64.

5. *Eskov V.M., Khadartsev A.A., Eskov V.V., Vokhmina J.V.* Chaotic dynamics of cardio intervals in three age groups of indigenous and nonindigenous populations of Ugra // Advances in Gerontology. 2016. Vol. 6, № 3. P. 191–197.

6. *Eskov V.M., Pyatin V.F., Eskov V.V., Ilyashenko L.K.* Heuristic work of the brain and artificial neural networks // Biophysics. 2019. Vol. 64, № 2. P. 125–130.

7. *Eskov V.V., Filatova D.Yu., Ilyashenko L.K., Vochmina Yu.V.* Classification of uncertainties in modeling of complex biological systems // Moscow University Physics Bulletin. 2019. Vol. 74, № 1. P. 57–63.

8. *Filatov M.A., Ilyashenko L.K., Makeeva S.V.* Psychophysiological parameters of students before and after translatitude travels // Human Ecology. 2019. № 4. P. 18–24.

9. *Zilov V.G., Eskov V.M., Khadartsev A.A., Eskov V.V.* Experimental confirmation of the effect of "Repetition without repetition" N.A. Bernstein // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2017. Vol. 1. P. 4–8.

10. *Zinchenko Y.P., Khadartsev A.A., Filatova O.E.* Introduction to the biophysics of homeostatic systems (complexity) // Complexity. Mind. Postnonclassic. 2016. № 3. P. 6–15.

Использование глубоких сверточных сетей для обнаружения дорожных знаков в задаче автовождения

И.С. Фомин, С.Р. Орлова, А.В. Бахшиев

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург; email: i.fomin@rtc.ru (s.orlova@rtc.ru, alexab@rtc.ru)

В последние несколько лет активно развиваются область беспилотных автомобилей, технологии автономного вождения. Крупные производители автомобилей и корпорации, связанные с информационными технологиями (Volkswagen, General Motors, Nissan, Volvo, Google, Uber, Яндекс и др.), выполняют исследования и разработку систем вождения различного уровня автономности. Существует множество небольших компаний и исследовательских групп, ведущих изыскания в том же направлении.

Всего существует 6 уровней автоматизации автомобилей в стандартной классификации, созданной сообществом автомобильных инженеров (SAE) [1].

Уровень 0. Отсутствие контроля над машиной, но может присутствовать система уведомлений.

Уровень 1. Водитель должен быть готов в любой момент взять управление на себя. Могут присутствовать следующие автоматизированные системы: круиз-контроль, автоматическая парковочная система и система предупреждения о сходе с полосы.

Уровень 2. Водитель должен реагировать, если система не смогла справиться самостоятельно. Система управляет ускорением, торможением и рулением. Система может быть отключена.

Уровень 3. Водитель может не контролировать машину на дорогах с предсказуемым движением (например, автобаны), но должен быть готов взять управление.

Уровень 4. Аналогично 3-му уровню, но система уже не требует внимания водителя.

Уровень 5. Со стороны человека не требуется никаких действий, кроме старта системы и указания пункта назначения. Автоматизированная система может доехать до любой точки назначения, если это не запрещено законом.

С точки зрения решения целевой задачи – перемещение транспортного средства из одной точки в другую – на глобальной дорожной карте можно выделить:

1) задачи или метасценарии, которые определяются средой (магистраль, дорога в населенном пункте, прилегающая территория) и конечной целью (движение в заданную точку на глобальной карте, парковка и т. п.);

2) сценарии, которые представляют собой протяженные во времени сложные действия, допускающие многовариантное выполнение в зависимости от состояния среды (перестроение, обгон);

3) технологические операции (ТОП) – протяженные во времени действия, являющиеся составными частями сценариев (удержание полосы движения, обнаружение препятствий);

4) алгоритмы – комбинация методов, реализующих технологические операции.

Основные сценарии, из которых формируются метасценарии:

– выезд на улицу с придомовой территории;
– проезд перекрестка прямо/направо/налево;
– удержание дистанции и полосы движения;
– перестроение;
– обгон;
– парковка.

Каждый из этих сценариев подразумевает выполнение некоторого набора технологических операций (например, удержание полосы движения, обнаружение препятствий и др.).

На всех уровнях автоматизации от системы требуется распознавать дорожную обстановку, а также различные подвижные и неподвижные препятствия, что реализуется соответствующими технологическими операциями. При этом для получения данных может использоваться не только монокулярная камера, но и камера инфракрасного диапазона, стереокамеры, лидары и радары.

В данной работе рассматриваются методы технического зрения, применяемые для обнаружения и классификации дорожных знаков.

Существующие решения

Первая группа методов обнаружения – методы, основанные на признаках, – рассматривают объект как комбинацию различных признаков, таких как части объекта, углы и края, пятна и т. д. Сравнивая области интереса (полученные, например, методом скользящего окна) на изображении с наборами признаков, соответствующими искомым объектам, можно определить, находится в области интереса объект или же нет. Как правило, в настоящее время в таких методах применяются признаки Хаара, поскольку они позволяют достичь наибольшей скорости работы метода.

Также распространены методы, использующие HOG (Histogram of Oriented Gradients) – гистограмму направленных градиентов. Основной идеей алгоритма является допущение, что внешний вид и форма объекта на участке изображения могут быть описаны распределением градиентов интенсивности или направлением краев. Изображение равномерно разделяется на маленькие связные области, именуемые ячейками. Для каждой ячейки рассчитываются гистограммы направлений градиентов. Комбинация таких гистограмм называется дескриптором. Конечным шагом в распо-

знавании объектов с использованием HOG является классификация дескрипторов при помощи системы обучения с учителем – обычно это метод опорных векторов (SVM), называемый также методом классификатора с максимальным зазором и относящийся к семейству линейных классификаторов.

Также часто применяется фильтрация по цвету и яркости в алгоритмах выделения областей интереса на изображении и в алгоритмах непосредственно локализации и классификации [2].

Методы, основанные на признаках, позволяют обнаруживать движущиеся и неподвижные объекты с достаточно хорошими скоростью и точностью работы. В последние годы различные исследовательские группы продолжают предлагать усовершенствованные алгоритмы обнаружения, использующие признаки Хаара и гистограммы направленных градиентов [3].

Вторая группа методов – нейросетевые методы. Несколько лет назад, после появления новых вычислителей и архитектур, применение нейронных сетей для распознавания изображений (классификации, обнаружения, сегментации) не только стало возможным и во многих случаях целесообразным и эффективным, но и открыло новые перспективы в области компьютерного зрения и обработки информации. Для распознавания изображений применяются сверточные нейронные сети, входной слой которых принимает не вектор значений, а матрицу (которой и является изображение в цифровом формате, с одним каналом в случае черно-белого изображения и с тремя – в случае цветного). Такие сети выполняют над изображением ряд сверток с фильтрами (которые также являются матрицами, обычно 1×1, 3×3, 5×5 и 7×7, с произвольным количеством каналов), веса которых настраиваются в процессе обучения. После сверточных слоев могут идти несколько полносвязных слоев для представления результата в виде вероятностей принадлежности к классам; в случае архитектур для обнаружения все слои зачастую являются сверточными, ведь результат работы таких сетей – выделение областей, в которых находятся объекты. Все современные архитектуры являются глубокими, т. е. содержат большое количество слоев: для классификации более 10, для обнаружения – десятки.

В 2015 г. была предложена принципиально новая архитектура нейронной сети Faster R-CNN [4], особенностью которой было однократное использование сверточной нейронной сети, выделяющей признаки классов объектов, на всё изображение целиком, т. е. отказ от скользящего окна. Это позволяло значительно ускорить работу сети.

Затем появились архитектуры YOLO (You only look once) [5] и SSD (Single shot multibox detector) [6], которые использовали тот же подход, т. е. однократное использование сверточной нейронной сети для получения карты признаков, но имели свои особенности. YOLO имела последовательную структуру, полносвязные слои и меньшее количество слоев, чем SSD. SSD же была полностью сверточной и объединяла в одном из конечных слоев результаты (карты признаков), полученные с нескольких последовательно расположенных сверточных слоев. Скорость и точность работы этих двух нейронных сетей значительно превышала полученные в [4] результаты (при использовании Faster R-CNN).

Наконец, самой новой наиболее известной архитектурой в настоящее время является YOLOv2 [7]. Это улучшенная версия YOLO, которая позаимствовала некоторые удачные особенности из архитектуры SSD: сеть полностью состоит из сверточных слоев и имеет слои выделения признаков различного размера, чтобы улучшить обнаружение объектов в различном масштабе.

Среди работ, посвященных распознаванию объектов с помощью нейронных сетей, существует несколько, сосредоточенных на распознавании дорожных знаков с использованием нейронных сетей [8, 9].

Архитектуры сетей

Модели нейронной сети архитектуры YOLOv2 содержат различное количество сверточных блоков в верхней части сети. В результате прохождения изображения через блоки порождается набор карт признаков. Все полученные карты затем проходят через классификатор (с функцией активации softmax) и подавление немаксимумов, чтобы отсечь повторяющиеся предсказания.

В YOLO для выбора областей интереса применяется скользящее окно одного или разных масштабов, разбиение сеткой на фрагменты или набор заранее определенных рамок с различными размерами. Архитектура YOLOv2 построена таким образом, что изображение условно разбивается на ячейки 32×32 пикселя и сеть получает предсказания для таких ячеек. Для каждой ячейки предсказывается B наборов из N рамок разных размеров. Авторы модели экспериментально подобрали наиболее оптимальные значения: $B = 2$, $N = 5$. В итоге нейронная сеть строится таким образом, что от входного изображения до набора результатов обнаружения происходит один полный расчет нейронной сети.

Интересен также и способ подбора размеров рамок – они зависят от данных. Набор данных, использующихся для обучения или тестирования сети, разбивают на N кластеров с помощью алгоритма k средних. Таким образом, если имеется множество мелких объектов, то в наборе будут рамки с малыми размерами, если имеется множество вытянутых объектов, то набор будет содержать соответствующие рамки. Это позволяет сделать работу нейронной сети быстрой и точной.

Сеть TinyYolo описана в работе [5] и рассмотрена в двух вариантах: обучение без предобученных весов и с использованием весов, предобученных на ImageNet. Архитектура сети имеет вход 416×416×3, представляет собой последовательность сверток 3×3 с последующими слоями подвыборки (max-pooling) 2×2 с шагом 2. В конце два

последовательных слоя свертки 3×3 и слой свертки 1×1, развертывающий данные в вектор для обработки классификатором.

Архитектура FullYolo описана в работе [7], имеет вход 224×224, 19 сверточных слоев. Вначале идут две свертки 3×3, разделенные подвыборкой 2×2 с шагом 2, затем 2 группы из 3 сверточных слоев (свертка 3×3 – свертка 1×1 – свертка 3×3), разделенные подвыборкой 2×2 с шагом 2, и 2 группы из 5 сверточных слоев (свертка 3×3 – свертка 1×1 – свертка 3×3 – свертка 1×1 – свертка 3×3), также разделенные подвыборкой 2×2 с шагом 2. После последней группы идет свертка 1×1 без подвыборки, разворачивающая результаты в вектор на 1000 значений и слой softmax, выделяющий максимальный отклик из этого вектора. Сравнение архитектур YOLO с другими сетями подобного класса по соотношению точности и производительности представлено на рис. 1.

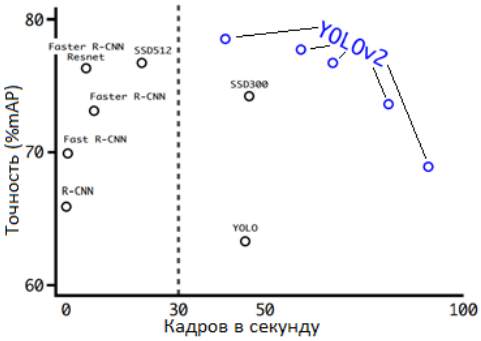


Рис. 1. Сравнение YOLO и других сетей по точности и быстродействию

Экспериментальные исследования

Реализация модели YOLOv2 была выполнена с использованием фреймворков TensorFlow и Keras. Преимущество этой версии в том, что она позволяет более удобным способом выполнять обучение, контролировать качество обучения в процессе и удобно управлять процессом обучения, более простым способом выполнять тестирование результатов обучения. Также эта реализация предоставляет возможность обучать несколько дополнительных вариантов архитектуры. Для экспериментов использовалась модель YOLOv2 Tiny. Для обучения использовалась российская база автодорожных знаков [8], для предобработки данных для обучения и тестирования – встроенные методы библиотеки OpenCV. Были также реализованы программные модули аугментации базы данных, создания выборок по классам и модуль оценки, выполняющий расчет некоторых метрик для оценки качества работы модели.

Использованный для обучения сети набор данных [8] представляет собой набор изображений с размеченными положениями дорожных знаков. Уникальность набора для решаемой задачи в том, что он содержит изображения именно российских знаков. Примеры в наборе получены в различное время суток при различной погоде и в разных местах. Все они взяты из различных свободных источников в интернете. Число изображений в обучающем и тестовом наборах, число примеров для тех знаков, которые использованы в первом эксперименте, показаны в табл. 1.

При расчете результатов и определении качества работы сетей использовалось несколько различных метрик.

Intersection over Union (IoU) определяет меру совпадения между двумя обнаружениями объекта, описана, в частности, в правилах соревнования Pascal VOC [10]. Определяется отношением площади пересечения двух RoI к площади объединения и может принимать значения от 0 до 1. Точность и полнота рассчитываются исходя из количества верно обнаруженных, пропущенных и ошибочно обнаруженных объектов. TP (true positives) – число верно обнаруженных объектов, когда предсказанная рамка объекта имеет IoU с истинной не ниже порогового значения IoU, а его класс предсказан с уверенностью не ниже порогового значения уверенности. FP (false positives) – число ложноположительных объектов, все обнаруженные объекты, не отнесенные к TP. FN (false negatives) – число объектов, которые присутствуют на изображениях и в разметке, но не были обнаружены методом. Используя эти метрики, можно рассчитать точность и полноту. Точность – это TP / (TP + FP), процент верно обнаруженных объектов среди всех объектов, полнота – это TP / (TP + FN), метрика количества успешно обнаруженных объектов относительно пропущенных. Далее при расчете устанавливается класс объекта и ряд пороговых значений уверенности. Для выбранного класса и каждого такого значения уверенности получают полноту и точность. Получается ряд точек, по которым можно построить график зависимости точности от полноты.

Таблица 1

Параметры наборов данных

Параметр	Обучающий набор	Тестовый набор
Число изображений	58188	1000
Все знаки	102555	1749
«Пешеходный переход»	23839	425
«Главная дорога»	10763	198

Так как значения точности и полноты находятся в диапазоне от 0 до 1, средней точностью по классу будет площадь под полученной кривой. На практике среднюю точность по классу считают приближенно – например, рассчитывают среднее арифметическое по ряду значений точности.

Средняя точность по всем классам (mean average precision, mAP) – среднее арифметическое по средним точностям по классам. Если в выборке всего один класс, то очевидно, что средняя точность по всем классам совпадает со средней точностью по классу.

На первом этапе экспериментальных исследований проведены следующие эксперименты по

обучению сети на различном числе классов в выборке: 1) 1 класс: «пешеходный переход» (5.19.1), 2) 2 класса: «пешеходный переход», «главная дорога» (5.19.1, 2.1), 3) 3 класса: «пешеходный переход», «главная дорога», «знак» (5.19.1, 2.1, sign), 4) 1 класс: «знак». Классом «знак» (sign) в выборке обозначались все остальные классы.

Результаты представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, средняя точность по узким классам 5.19.1 («пешеходный переход») и 2.1 («главная дорога») довольно высока, в то время как средняя точность по суперклассу «знак» не превышает 85 %. В эксперименте 3 с выборкой, содержащей и узкие классы, и суперкласс, средняя точность по всем классам ниже, чем в эксперименте 2 без суперкласса, именно из-за влияния на общий результат точности по суперклассу. При этом точность по узким классам не претерпела значительных изменений.

Таблица 2

Сравнение результатов на всех данных

№	IoU	Увер.	AP			mAP
			5.19.1	2.1	знак	
1	0,2	0,4	0,89	-	-	0,89
2	0,2	0,4	0,88	0,94	-	0,91
3	0,2	0,4	0,91	0,93	0,82	0,89
4	0,2	0,5	-	-	0,84	0,84

В табл. 3 для наглядности указаны лучшие результаты для каждого эксперимента. Лучшим результатом считался вариант с такими пороговыми значениями IoU и уверенности, при которых произведение точности и полноты (Т*П) по всем классам было максимальным. В колонках TP, FP, FN указаны числа истинно-положительных, ложноположительных и ложноотрицательных обнаружений соответственно.

Таблица 3

Сравнение результатов на лучших данных

№	TP	FP	FN	Точ.	Пол.	Т*П
1	2913	331	382	0,90	0,88	0,80
2	4560	431	477	0,91	0,91	0,83
3	5528	1617	815	0,77	0,87	0,67
4	2792	404	429	0,87	0,87	0,76

По полученным результатам можно заметить, что при увеличении порогового значения IoU снижаются полнота и точность, при этом при IoU более 0,5 полнота снижается в большой степени. Принятым значением считается пороговое значение IoU, равное 0,3, в данном случае наилучшие точность и полнота получены при IoU = 0,2.

Второй эксперимент заключался в обучении нейронной сети на наборе данных, в котором присутствует 16 классов дорожных знаков с различными параметрами процесса обучения. В качестве параметров рассматривались: скорость обучения сети, вклад в ошибку правильно обнаруженных объектов, вклад неправильно обнаруженных объектов, вклад ошибок по классу и положению. Всего было выполнено 7 запусков обучения с различными вариантами этих параметров. Второй запуск отброшен по причине расхождения обучения, эти параметры не сочетаются. Параметры вариантов и результаты показаны в табл. 4.

Таблица 4

Результаты обучения с разными параметрами

Параметр	Запуски обучения					
	1	3	4	5	6	7
Скорость обучения	1e-4	1e-4	1e-4	1e-4	1e-5	1e-4
Множитель объектов	8,0	8,0	10	8,0	6,0	4,0
Множитель необъектов	1,0	1,0	2,0	1,0	3,0	1,0
Множитель координат	5,0	5,0	5,0	5,0	4,0	5,0
Множитель класса	5,0	5,0	5,0	5,0	4,0	5,0
Предобуч. веса	Экс 4	Нет	Экс 4	Зап 2	Экс 4	Экс 4
Число эпох	100	60	100	100	500	80
% mAP	51,9	52,1	55,6	52,3	60,5	55,7

В качестве предобученных весов для большинства вариантов использовались веса от 4-го варианта в первом эксперименте (обучение только на классе «знак»). Следует обратить внимание на несколько моментов. Увеличение скорости обучения сети на выбранном наборе данных ведет к расхождению процесса обучения (запуск 2), снижение скорости обучения и существенное увеличение количества эпох ведет к увеличению точности. Обучение с нуля сходится к достаточно высокой точности. Изменение штрафов на функцию ошибки оказывает не такое сильное влияние на итоговую точность, как ожидалось.

Для проверки качества работы обученных сетей на реальных данных были подготовлены два экспериментальных набора данных на основе видеозаписей, полученных с видеорегистратора автомобиля (рис. 2).

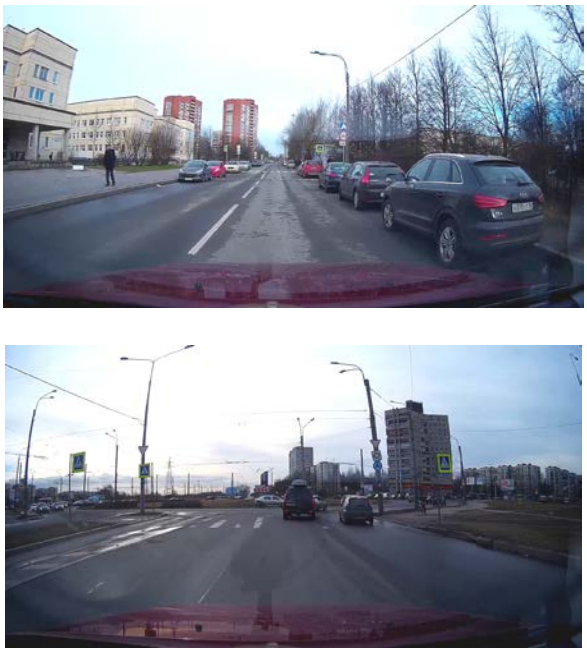


Рис. 2. Изображения с тестовых видеозаписей

Обе записи были получены в дневное время суток в пасмурную погоду, что означает отсутствие искажения изображений из-за засветки, солнечных бликов, тумана, дождя, снега и т. п. Первая запись содержит прямой проезд по дороге, знаки расположены по правой стороне дороги, всего из видеозаписи было выбрано 174 изображения. Вторая запись содержит проезд по сложному перекрестку, содержащему различные дорожные знаки, всего из видеозаписи было извлечено 252 изображения. Результаты тестирования приведены в табл. 5. Для каждого видео были отобраны знаки для проведения эксперимента: для первого (Ex3-1) 1.23 («Осторожно: ДЕТИ») и (Ex3-2) 5.20 («Искусственная неровность»), для второго (Ex3-3) 2.4 («Уступите дорогу») и (Ex3-4) 5.19.x («Пешеходный переход» – направленный слева направо и справа налево).

Таблица 5

Эксперимент на реальных данных

Сеть	1	3	4	5	6	7
B1 - 1.23 (Ex3-1)	0,63	0,83	0,69	0,63	0,90	0,67
B1 - 5.20 (Ex3-2)	0,16	0,19	0,12	0,11	0,03	0,13
B1 - все	0,39	0,51	0,41	0,36	0,47	0,41
B2 - 2.4 (Ex3-3)	0,24	0,28	0,19	0,28	0,24	0,26
B2 - 5.19.x (Ex3-4)	0,49	0,51	0,52	0,52	0,55	0,53
B2 - все	0,36	0,41	0,35	0,41	0,39	0,40

Скорость работы для графического процессора NVIDIA GeForce GTX 1070 составила 30 кадров в секунду. Это позволяет использовать модель в режиме реального времени для указанного оборудования.

Заключение

Решения на основе сверточной сети YOLOv2 позволяют достичь высокого качества обнаружения одновременно с приемлемым быстродействием. Эксперименты показали, что использование уменьшенного варианта YOLOv2 Tiny для задачи обнаружения дорожных знаков позволило получить достаточно высокую точность обнаружения по одиночному кадру – 84 % для объединенного класса «знак» и около 90 % для отдельных классов и их сочетания с суперклассом. Наилучшее качество работы достигнуто при задании пороговых значений IoU = 0,2 и значения уверенности от 0,4 до 0,5. Таким образом, данный метод может быть использован в практических приложениях для обнаружения знаков дорожного движения.

В будущем планируется выполнить эксперименты с бóльшим числом классов (всего в исходном наборе представлено 156 классов). Также представляет интерес сравнение с другими архитектурами нейронных сетей, в первую очередь малых и сверхмалых размеров, таких как SqueezeDet, для дальнейшего снижения требований к вычислительным ресурсам.

Работа проводилась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00924-19-00 «Облачные сервисы автоматического синтеза и валидации наборов данных для обучения глубоких нейронных сетей в задачах распознавания образов».

Литература

1. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles / SAE International. URL: http://standards.sae.org/j3016_201609/. (Дата обращения: 10.06.2019).

2. *Andrey V., Jo K.H.* Automatic detection and recognition of traffic signs using geometric structure analysis // IEEE 2006. SICE-ICASE : International Joint Conference. 2006. P. 1451–1456.

3. *Greenhalgh J., Mirmehdi M.* Real-time detection and recognition of road traffic signs // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2012. Vol. 13, № 4. P. 1498–1506.

4. *Ren S., He K., Girshick R., Sun J.* Faster r-cnn: towards real-time object detection with region proposal networks // Advances in neural information processing systems. 2015. P. 91–99.

5. *Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A.* You only look once: unified, real-time object detection // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. P. 779–788.

6. *Liu W. [et al.].* Ssd: single shot multibox detector // European conference on computer vision. Cham : Springer, 2016. P. 21–37.

7. *Redmon J., Farhadi A.* YOLO9000: better, faster, stronger // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017. P. 7263–7271.

8. Russian traffic sign dataset : graphics and media lab. URL: https://graphics.cs.msu.ru/en/research/projects/rtsd. (Дата обращения: 10.06.2019).

9. *Kale J., Mahajan R.C.* A road sign detection and the recognition for driver assistance systems // International Conference on Energy Systems and Applications / IEEE. 2015. P. 69–74.

10. *Everingham M., Van Gool L., Williams C.K., Winn J., Zisserman A.* The Pascal visual object classes (voc) challenge // International Journal of Computer Vision. 2010. V. 88(2). P. 303–338.

Когнитивные методы и алгоритмы адаптированного к изменчивости среды мультистатического подводного наблюдения

А.И. Хилько, А.Г. Хоботов, А.А. Хилько, В.И. Калинина

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
email: A.khil@appl.sci-nnov.ru

Самопознание и самоутверждение человека реализуются восприятием и анализом окружающего и внутреннего мира. Вновь воспринимаемые элементы сознания присоединяются к уже имеющейся индивидуальной системе элементов и представлений, определяющей уникальный облик сознания каждого человека. Осуществляемый разумом непрерывный процесс мышления обеспечивает восприятие нового как путем присоединения, так и путем совершенствования и гармонизация имеющегося состава сознания человека. Направление и эффективность такого процесса для индивидуума задаются при рождении. Исходя из личностного облика сознания отдельного человека для анализа и относительного синтеза можно полагать, что присущий ему индивидуальный процесс познания мышлением разума на некоторых этапах является самостоятельным (автономным) процессом. Однако в общем случае сознание нельзя считать автономным, поскольку, как минимум, в процессе восприятия и утверждения новых представлений, наряду с работой разума, оперирующего при восприятии новых элементов уже имеющимся составом, сознание человека пользуется интуицией, механизм и состав представлений которой скрыт от разума. В процессе самоопределения сознание человека (в широком смысле – сознание объединенной совокупности людей) осуществляет построение промежуточных представлений о себе, которые можно назвать симуляторами сознания. Симуляторы на конкретном этапе развития сознания с разной полнотой и адекватностью отражают и имитируют те или иные аспекты сознания и помогают путем их исследования продвигаться к цели. К ним можно отнести, в частности, устройства с искусственным интеллектом, которые облекаются в совокупность физических и математических моделей, алгоритмов и технологических форм [1, 2]. Главным принципом существования симулятора является автономное адаптивное наблюдение и исследование внешнего окружения в соответствии с заданной при его создании стратегией. Функционирование (жизнь) симулятора заключается в восприятии элементов в окружающей среде и либо в определении их связей с имеющимися в составе симулятора представлениями (наблюдение), либо в расширении имеющихся представлений путем дополнения новых элементов к имеющимся элементам (исследование). Отметим, что характеризующие сознание человека понятия используются далее при построении и исследовании симулятора лишь условно, исходя из интуитивного восприятия. Однако, таким образом развивая когнитивный подход, можно обозначить в симуляторе компоненты и режимы аналогичные тем, которые характеризуют сознание человека, и наметить пути построения используемых при научном анализе методов физического и математического моделирования. Восприятие внешних (дистанцированных) элементов сознанием человека и, по аналогии, симулятором сознания осуществляется системой сенсоров и манипуляторов, непосредственно контактирующих с физическими полями, соединяющими сознание и объекты восприятия. Концентрация сознания при восприятии внешнего элемента осуществляется переориентировкой внутреннего состава путем априорно осознанного ослабления малозначимых связей элементов сознания и усиления ожидаемых (в рамках известного состава) связей и элементов, тяготеющих к вновь воспринимаемому и вновь утверждаемому элементу на основе, в частности, принципов аналогии, долженствования и гармонии. Соответствующая переориентация имеющегося состава элементов сознания и, по аналогии, симулятора основывается на формировании представления об уравновешенной, известной ситуации (невозмущенный состав), о наблюдаемом или исследуемом возмущении (утверждаемый тезис – объект) и о мешающих помеховых возмущениях (антитезис – отсутствие объекта). Последовательные стадии переориентации состава (элементы траектории поиска) выполняются либо целевым образом (при наблюдении), либо в режиме свободного поиска (при исследовании). Стратегия функционирования (предназначение) симулятора определяется заданной при его создании целью – наблюдением и исследованием объекта. Выполнение такой задачи заключается в поиске и принятии решения в пределах заданного многомерного пространства параметров модели наблюдаемого объекта (аналог определенного состава и связей элементов сознания). Каждый элемент и представление в сознании и, соответственно, в симуляторе имеет форму бинера, то есть является парой взаимно противоположных утверждения и его формального отрицания. Компоненты бинера интерпретируются в понятиях пары «сигнал – шум». Синтез (нейтрализация) как элементарных, так и более сложных бинеров представлений в симуляторе осуществляется путем принятия решения, при этом используются адаптивные к контексту и априорной информации решающие правила. Аналогом мышления в симуляторе является развитие моделей многомерного пространства параметров, которое осуществляется

включением новых элементов представлений и исследованием его структуры и определением оптимальных траекторий поиска решений. В общем случае стратегия существования симулятора сознания может быть определена лишь с привлечением социального аспекта, то есть с привлечением понятия связей и взаимодействий с другими, подобными, симуляторами, а также с управляющим центром. Каждый элементарный компонент состава (локально адаптированные в пространстве параметров решающие правила) симулятора можно рассматривать как аналог совокупности нейронов. Совокупность элементов и представлений образует сложнопостроенную нейроноподобную сеть, состав и структура связей которой перестраиваются в зависимости от решаемой задачи и обновляемой априорной информации.

Математически функционирование симулятора может быть сформулировано как проблема оптимального поиска решения обратной задачи (исследование и наблюдение объекта) в неоднородной нестационарной среде, при решении которой траектория поиска и решающие правила адаптивно подстраиваются к изменениям объектов и условий. Для конкретизации дальнейшего анализа рассмотрим возможности построения симулятора на примере интегрированной сетевой системы подводного наблюдения (ИССПН) [3]. Адаптация работы ИССПН к изменениям условий наблюдения в мелком море возможна лишь при использовании постоянно обновляемых данных о структуре гидроакустического (ГА) волновода, конфигурации решеток, параметров реверберационных помех и шумов, обеспечивающих соответствующую цели подстройку структуры симулятора. Подстройка состоит в фокусировке сенсоров, оптимизации пороговых значений, адаптивной подстройке траектории поиска и решающих правил [3]. Указанные априорные данные формируются в виде геоинформационной океанологической (ГИО) модели (в виде базы ранее измеренных данных) района наблюдений с учетом адаптивного текущего обновления ее параметров. Кроме того, используются физические модели формирования информационных каналов передачи данных об объекте и помехах в них. В их число входят модели распространения гидроакустических полей в плоскослоистых рефракционных горизонтально неоднородных волноводах, дифракции ГА-полей наблюдаемыми объектами, рассеяния ГА-полей случайно на распределенных неоднородностях океанической среды, формирования гидроакустических НЧ-шумов ветрового волнения, а также модели возбуждения маломодовых ГА-сигналов совокупностью взаимодействующих излучателей. Совокупность указанных моделей, а также моделей поиска и принятия решений объединяются в имеющую нейроноподобную структуру имитационную модель наблюдения (ИН-модель) [3], которая в симуляторе является аналогом разума. Такая модель позволяет трансформировать эмпирические данные в априорную информацию в форме гипотез, используемых при синтезировании бинеров элементов состава (совокупности нейронов). Синтез осуществляется адаптивной оценкой значений параметров наблюдаемых неоднородностей с использованием методов статистической проверки гипотез. ИН-модель при этом выполняет процессорные функции. Исследование и гармонизация структуры пространства параметров с помощью ИН-модели является аналогом мышления. При этом осуществляется априорная оптимизация траекторий поиска решений и решающих статистик и порогов, в том числе на основе использования нейроноподобных контекстно-ориентированных решающих статистик [3]. Такой режим функционирования симулятора аналогичен нейтрализации бинеров представлений, то есть осмыслению (уравновешиванию) состава сознания симулятора. Частным случаем переориентации сознания симулятора, выполняемой ИН-моделью, является оценка размеров и конфигурации поля зрения симулятора в зависимости от изменяющихся условий и объектов наблюдения. Оно определяется зоной, в пределах которой отдельные бинерные элементы могут быть синтезированы (нейтрализованы). Симулятор кроме ИН-модели (аналога разума или интеллекта) имеет в своем составе систему элементов, которые можно рассматривать как тело симулятора. Это сенсоры и манипуляторы (в рассматриваемом варианте – излучатели), физический носитель и источник питания, а также система контроля их состояния. Имеется также канал связи с центром управления, который включается в случае необходимости передачи результатов наблюдения и информации о состоянии симулятора. При выполнении перечисленных операций ИН-модель позволяет обеспечить оптимальную работу симулятора с заданной эффективностью с учетом изменчивости условий наблюдения. При этом задаваемая при создании и функционировании ИССПН в мелком море эффективность должна достигаться при удовлетворении требований по критерию минимизации стоимости и сложности реализации с учетом ограничений требуемых энергетических, временных и информационных ресурсов. Блок-схема алгоритма симулятора наблюдения показана на рис. 1. Согласно этому алгоритму внешние устройства сенсоров и манипуляторов (СМУ) включают в себя подсистемы: Iс – сенсоры (приемники – П) и Iм – манипуляторы (излучатели – И), подсистему VIII контроля гидрологии (Г), конфигурации решеток (Р) и параметров ветра и шумов (В) и подсистему IX внешних приемников неакустического типа (ВП), а также блок XI датчиков физического состояния и энергетической обеспеченности (Э). Алгоритмическая часть (АЧ) состоит из блока II принятия решений, в который входят блоки решающих статистик (С), блок накопления (Σ), блок принятия решения (РУ), и блока формирования, представления и архивации результатов наблюдения (РН). Блок III объединяет блок моделей (М) и блок формирования траектории поиска решения (ТП). Блок IV обозначает многократное повторение генерации гипотез, включающий возбуждение зон-

дирующих импульсов. Блок V – это блок визуализации (В), интерпретации и управления экспертом (Э). Блок VI – блок адаптационного модуля (АМ). Кроме блока сенсорных устройств, система автоматического наблюдения может иметь еще канал поступления информации о состоянии системы в виде блока VII автоматизированного управления, включающего блок контроля работы алгоритмов (К), контроля условий наблюдения (УН), контроля тактической ситуации или сценария наблюдения (блок ТС), а также энергообеспечения (Э). Внешним, не входящим в состав симулятора устройством (блок Х) является подсистема управления функционированием симулятора (УС), состоящая из блока контроля тактической ситуации (КС) и информационно-аналитической базы (ИАБ). Связь с симулятором система УС осуществляет на основе анализа ситуации. Симулятор в исключительном случае запрашивает УС для принятия решений в уникальных ситуациях либо в ситуациях, угрожающих существованию симулятора.

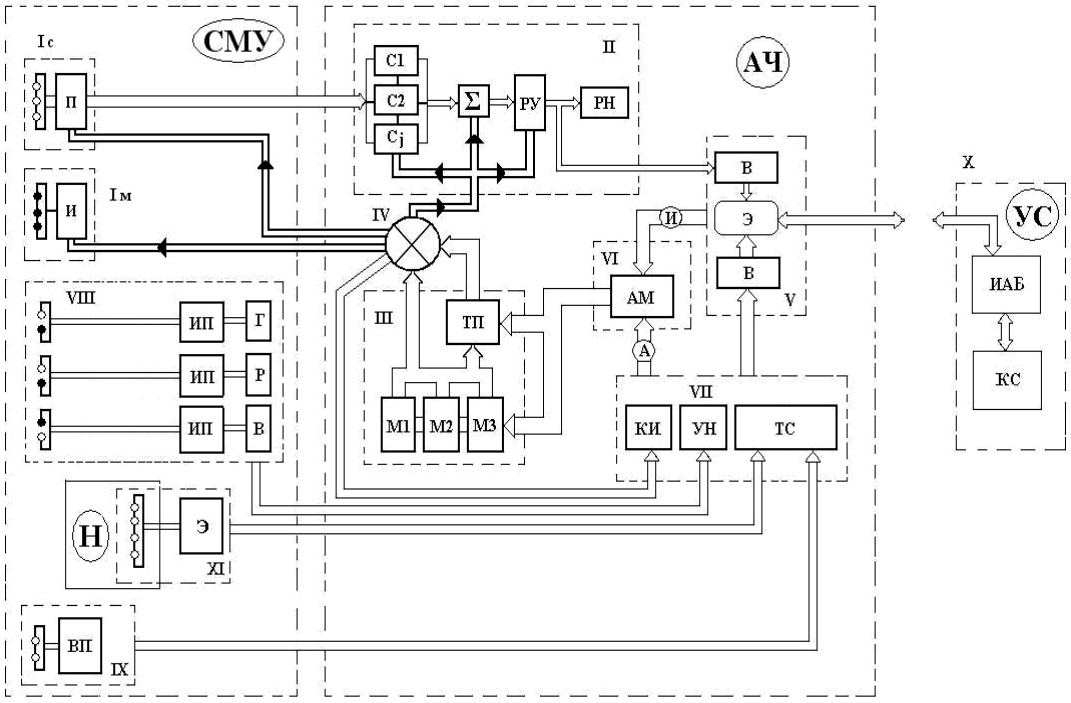


Рис. 1. Блок-схема функционирования симулятора автономной системы акустического наблюдения

Представленная на рис. 1 нейроноподобная система функционирования симулятора автоматического наблюдения представляет собою совокупность физических моделей формирования сигналов и помех, геоинформационной базы для описания сложно построенной среды и условий наблюдения, а также подсистемы оптимизации траекторий поиска решений в пространстве параметров наблюдаемых неоднородностей. Симулятор работает (существует) в автономном режиме и осуществляет адаптацию моделей на основе данных об изменчивости условий и целей наблюдения. Целью функционирования симулятора в автономном режиме является наблюдение заданных при его создании либо сформированных опытным путем объектов с максимально возможной точностью и дальностью и минимизация потребляемых для этого энергоинформационных ресурсов. Поскольку решаемые симулятором задачи наблюдения подобны тем, что решаются живыми организмами, и в частности, человеком, работа такой нейроноподобной системы может строиться на когнитивных принципах и алгоритмах поведения, которые могут быть получены путем изучения человека и других живых организмов [1]. В качестве одного из таких алгоритмов может выступать алгоритм контроля энергетического и информационного состояния системы по аналогии с контролем состояния и внутренней мотивации и модификации состояния, связанных с наличием желаемых и неприемлемых состояний симулятора. Например, у живых систем имеется чувство энергоинформационной недостаточности, сигнализирующее о приближении неприемлемого состояния организма (в частности, разрушения либо прекращения соответствия предназначению). Противоположной ситуацией функционирования живых организмов является положительная оценка своего состояния при полной энергоинформационной обеспеченности. Живые организмы оснащены соответствующими механизмами, понуждающими в интересах выполнения глобальных задач наблюдения экономить энергию и пополнять при возможности свои энергоинформационные ресурсы. Одним из подобных алгоритмов работы показанной ни рис. 1 симулятора наблюдения является контроль состояния приемных и излучающих решеток и расчет оптимальных апертурных распределений, которые адаптированы к изменяющемуся распределению скорости звука в местах постановки ука-

занных элементов, а также к их формам, реализующимся при воздействии подводных течений. Этот алгоритм выполняется блоками VIII, X, VII, VI, III и I. Еще одним алгоритмом перестройки состояния симулятора является перестройка траектории поиска решения за счет использования информации о наблюдаемых объектах, которая может по запросу быть представлена и внешним информационным центром (блоки X и V на рис. 1).

Еще одним важным принципом функционирования живых организмов является анализ (осмысление) вновь наблюдаемых объектов и построение соответствующих новых моделей с использованием ассоциативных связей с уже имеющимися моделями [2, 3]. Такой анализ осуществляется живыми системами в непрерывном режиме. По аналогии с живыми системами в симуляторе автономного ГА-наблюдения также могут быть организованы постоянно действующие режимы анализа структуры пространства наблюдаемых (оцениваемых) параметров и построения его моделей, что позволяет оптимизировать траекторию поиска решения (блоки VIII, VI, III и II). Кроме построения моделей наблюдаемых объектов, в алгоритме формирования траектории поиска решений используется модель шумов и помех [3]. Результатом анализа и построения обновленных моделей является построение баз данных по обликам наблюдениях объектов в виде совокупности данных (по аналогии с памятью живых организмов), которые описываются моделями связей в нейроноподобной среде в пространстве оцениваемых параметров (блок III на рис. 1). В случае, когда симулятор фиксирует информацию об объекте, который отсутствует в моделях, по аналогии с живыми системами следует предусмотреть алгоритмы построения эмпирических моделей и обращения к эксперту либо к подсистеме контроля тактической ситуации (КС) и информационно-аналитической базе (ИАБ). Эти системы не входят в состав симулятора и являются для него аналогом интуиции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-02-00128).

Литература:

1. *Хилько А.И., Яхно В.Г., Хоботов А.Г. [и др.]*. Проблемы создания симуляторов для автоматического управления потенциалом систем акустического зондирования океана // Сборник трудов XXII сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. М. : ГЕОС, 2010. С. 244–248.

2. *Сборщиков В.А., Воскресенский В.В. Хилько А.И. [и др.]*. Способ адаптивного распознавания объектов : Российский патент на изобретение № 207130876. Зарегистрирован 10.03.08.

3. *Смирнов И.П., Хилько А.А., Коваленко В.В. [и др.]*. Адаптивная интегрированная сетецентрическая система высокочастотного подводного наблюдения вблизи портовых зон и морских сооружений // Труды II Всероссийской акустической конференции, совмещенной с XXX сессией Российского акустического общества. Нижний Новгород : ИРФ РАН, 2017. С. 893–930.

Исследование эффективности нейроноподобных процедур свертки при подводной локации

А.Г. Хоботов[1], В.И. Калинина[1], А.И. Хилько[1], Н.С. Беллюстин[2]

[1]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
email: A.khil@appl.sci-nnov.ru
[2]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Большинство применений основывается на хорошо изученных свойствах нейронных сетей различной архитектуры, позволяющих устанавливать достаточно сложные зависимости во входном информационном потоке [1]. Эти свойства используются в таких применениях «традиционных» нейронных сетей, как распознавание образов, устранение избыточности представления информации в архивации данных, построение систем предсказания для решения экономических и иных задач и достаточно полно описаны в соответствующей литературе [2–4]. Эти нейронные сети можно классифицировать как сети с принудительной динамикой, которая определяется топологией сети и правилами модификации весов связей. Известны также нейронные структуры со свободной динамикой, описанные в работах [4–6], где показано, что нейросетевые структуры могут обладать собственной динамикой, определяемой параметрами сети, такими как значения порогов, пороговой функции, вид функции связей и ее параметры. В отличие от сетей с принудительной динамикой, такие сети предполагают, что веса связей распределяются по некоторому закону и остаются постоянными во время функционирования сети. Идея описания динамики таких сетей предложена в работе [5]. В качестве базового уравнения, описывающего динамику нейронной среды, предложено интегро-дифференциальное уравнение

$$U(\vec{r},t) = \iint_t F_0\left[U(\vec{r},t')\right]\Phi(\vec{r},\vec{r}')\exp(t',t)d\vec{r}dt\,, \quad (1)$$

где $\vec{r}$ – вектор в n-мерном пространстве, $\Phi(\vec{r},\vec{r}')$ – функция связи нейроноподобных элементов. Интеграл по пространству $\vec{r}$ подразумевается n-кратный, $U(\vec{r},t)$ – переменная, характеризующая состояние сети, F_0 – пороговая функция. Переписанное в дифференциальной форме уравнение (1) выглядит следующим образом:

$$dU(\vec{r},t)/dt = -U(\vec{r},t) + \int F_0[U(\vec{r},t')]\Phi(\vec{r},\vec{r}')d\vec{r}'. \quad (2)$$

В работе [5] исследуется динамика нейронной среды, описываемой уравнениями (1), (2), и показано, что условием стационарной динамики является условие монотонности пороговой функции $dF_0[U(\vec{r},t')]/dU \geq 0$ и взаимности функции связи $\Phi(\vec{r}-\vec{r}') = \Phi(\vec{r}'-\vec{r})$; в этих условиях сеть после некоторого переходного процесса принимает стационарное состояние. При несоблюдении этих условий динамика сети имеет более сложный немонотонный характер [4]. Такие сети можно классифицировать как сети со свободной динамикой. Исходя из общих соображений, можно предположить, что такие структуры более адекватны нейронным структурам естественной природы. Наличие сложных динамических режимов в таких структурах позволяет предположить возможность представления и хранения информации в нейронной сети в виде сигналов. Допустим, что в природных нейронных структурах хранение информации происходит в динамической форме (возможность существования таких режимов в нейроноподобных средах показана, например, в работах [4, 6]). При этом открытыми остаются вопросы о процедурах формирования «обобщенных» сигналов, сопоставления «входных» и «зафиксированных в памяти» информационных сигналов, а также о процедурах извлечения (вспоминания) исходных сигналов из «обобщенных» сигналов. Можно сформулировать некоторое предположение: с процедурной точки зрения мозг выполняет всего несколько функциональных операций – запоминание, хранение, извлечение (вспоминание) и узнавание (сопоставление). В этой связи правомерным является вопрос о том, можно ли показать возможность реализации таких операций на нейроноподобных структурах. В качестве структуры для моделирования таких операций можно выбрать нейронную структуру, основными элементами которой являются модели нейрона Мак-Каллока – Питтса. В моделях нейронных сетей, построенных на основе известных парадигм (см., например, [1–3]), модификация параметров сетей, таких как весовые коэффициенты, происходит по жестким, вполне определенным правилам на этапе настройки (обучения). И в конечном счете этим механизмом во многом определяется динамика таких сетей. В естественных нейронных структурах сложно проследить наличие такого механизма. Тем не менее некий механизм модификации значений параметров должен существовать. Можно предположить, что модификация значений этих параметров происходит в зависимости от внешнего контекста данных, поступающих на вход сети. В предположении о наличии сложных динамических режимов в естественных нейронных структурах (см. [4]) можно с достаточной степенью обоснованности считать возможной «сигнальную» форму хранения информации в естественных нейронных средах. В этом случае на основе операции, сходной с операцией «дизъюнкции», например, может быть сформирован некий обобщенный сигнал, представляющий «информационное» содержание когнитивной системы. Операция «конъюнк-

ции» в этом случае служит для отождествления сигнала на входе когнитивной системы с одним из сигналов, составляющих обобщенный сигнал.

Нейросетевые структуры, используемые в настоящем исследовании для сравнения сигналов, являются разновидностью сетей свободной динамики, особенность которых в том, что их характеристики, такие как параметры и функций связи, а также пороговые функции, определяются контекстом входных сигналов. Исходя из существующей системы классификации, такие сети можно классифицировать как однослойные синхронные многосвязные сети (сети с наличием обратных связей), гетерогенные по параметрам функций, связи и активации. В качестве базового уравнения, описывающего динамику нейронной среды, по аналогии с уравнениями, предложенными в [4], можно ввести уравнение

$$U(\vec{r},t) = \int_{\vec{r}}\int_{0}^{t} F_0\left[\Phi\left[U''(\vec{r},t),r'\right],T(U''(\vec{r},t))\right]\times \\ \times\varphi(t',t)d\vec{r}dt + u(\vec{r},0), \quad (3)$$

где $\vec{r}$ – вектор в n-мерном пространстве, Φ – функция связи нейроноподобных элементов, $U(\vec{r},t)$ – переменная, характеризующая состояние сети, F_0 – пороговая функция, $\varphi(t',t)$ – функция, характеризующая динамическую память сети, T – параметр, определяющий величину порога пороговой функции. Задача синтеза таких сетей заключается в выборе структуры сети и вида пороговых функций и функций связи. В силу нелинейности самой задачи аналитическое исследование таких сетей затруднено. Но представляет интерес моделирование таких структур и исследование их на основе моделей при их программной реализации. Особый интерес представляет реализация на таких структурах процедур сравнения и «комбинирования» различных сигналов. Основное уравнение динамики сети представлено ниже:

$$U(t) = \int\int_{0}^{t} F_0\{\Phi\left[S(r,t)I(\lambda,t)\right],T\left[S(r,t)I(\lambda,t)\right],t\}\times \\ \times\varphi(t',t)drd\lambda dt + U(t_0), \quad (4)$$

где $U(t)$ – выходной сигнал, $S(r, t)$, $I(\lambda, t)$ – сигналы на входах сети, r, λ – пространственные координаты. Процедуру сравнения (установления кросскорреляции [6]) знакопеременных сигналов сложной формы рассмотрим на примере сравнения одномерных ЛЧМ-сигналов. Будем считать основными параметрами, характеризующими эти сигналы и подлежащими идентификации, их фазочастотные характеристики. При дальнейшем анализе будем полагать, что на вход процедуры поступает ЛЧМ-сигнал $S(t)$ аддитивно смешанный с белым шумом $r(t)$. Определим значения параметров сигнала, например фазу входного ЛЧМ-сигнала. Процедура определения параметров сигнала заключается в генерации ЛЧМ-сигнала, аналогичного входному с произвольной фазой, сравнении генерированного (эталонного) сигнала с входным, в вычислении невязки с ее запоминанием, изменении фазы эталонного сигнала с последующим повторением процедуры сравнения и вычислением соответствующей невязки и определением экстремального значения невязки. Эталонный сигнал, соответствующий экстремальному значению невязки, считается совпадающим по фазовым характеристикам с входным. Процедура сравнения сигналов описывается следующими соотношениями:

$$U\{I(t),S(t),t\} = S(t)\cdot F[L(t),T(t)], \quad (5)$$

$$F[L(t),T(t)] = \begin{cases} 0, & L(t)\le T(t), \\ 1, & L(t) > T(t), \end{cases} \quad (6)$$

$$L(t) = -\left|\int_{t-a}^{t+a} S(t)dt\right|, \quad (7)$$

$$T(t) = \left[\int_{t-a}^{t+a} I(t)dt - \int_{t-a}^{t+a} S(t)dt\right]\cdot \mathrm{sign}(S(t)), \quad (8)$$

$$U\{I(t),S(t),t\} = I(t)\cdot\Phi[K(t),P(t)], \quad (9)$$

$$\Phi[K(t),P(t)] = \begin{cases} 0, & K(t)\le P(t), \\ 1, & K(t) > P(t), \end{cases} \quad (10)$$

$$K(t) = -\left|\int_{t-a}^{t+a} I(t)dt\right|, \quad (11)$$

$$P(t) = \left[\int_{t-a}^{t+a} S(t)dt - \int_{t-a}^{t+a} I(t)dt\right]\cdot \mathrm{sign}(I(t)). \quad (12)$$

Параметр a определяет окрестность суммирования (функции связи). В дискретном случае интегрирование заменяется суммированием. Функцию отклика процедуры сравнения можно определить как (13) или (16). Заметим, что параметры, в данном случае пороговой функции, определяются значениями входной и эталонной сигнальных функций. Кроме того, и область определения функции связи тоже можно определить как функцию входного или эталонного сигналов. В случае (5)–(8) отклик представляет собой модификацию эталонного сигнала. На участках совпадения фаз входного и эталонного сигнала значение сигнала отклика становится нулевым, а при несовпадении значения сигнала отклика совпадают с эталонным. В случае (8)–(12) сигнал отклика представляет собой аналогичным образом модифицированный входной сигнал. Функцию невязки можно определить как соотношение энергий исходного и модифицированного сигналов. В случае (5)–(8)

$$Q(t) = 1 - \int\left|U\left\{I(t),S(t),t\right\}\right|dt \,/\, \int|S(t)|\,dt, \quad (13)$$

а в случае (9)–(12)

$$Q(t) = 1 - \int\left|U\left\{I(t),S(t),t\right\}\right|dt \,/\, \int\left|I(t)\right|dt. \quad (14)$$

На рис. 1 показана блок-схема нейросетевой структуры, реализующей процедуры (7)–(10). Возможности таких структур в процедурах «сравнения» сигналов сложной природы и сравнение их с процедурами ковариационной свертки и вычисления L2P-нормы приводились в [6].

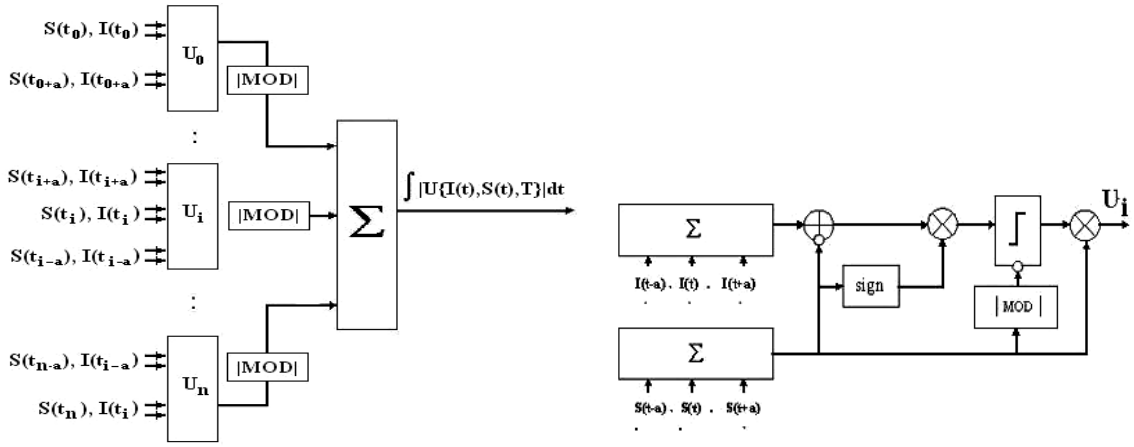


Рис. 1. Блок-схема нейросетевой структуры, реализующей процедуры (5)–(8)

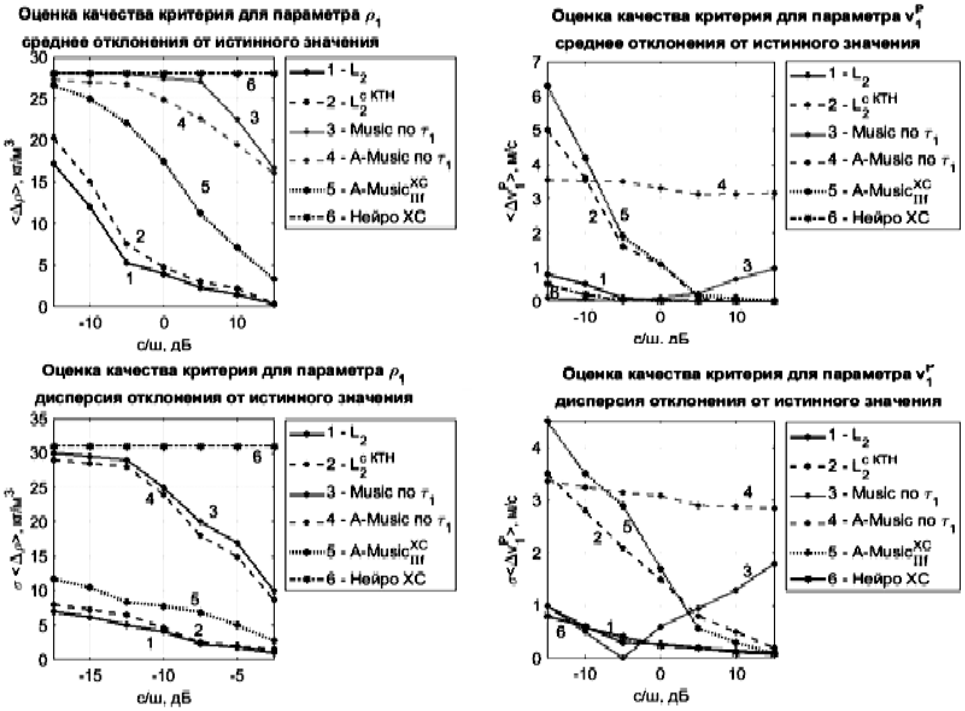


Рис. 2. Результаты оценки дисперсии и смещения оценок акустических параметров первого слоя осадков в пределах мелководного шельфа в зависимости от входного отношения сигналов к шуму

Эффективность сравнительных операций рассмотрим на примере задач сейсмоакустического (СА) зондирования морского дна с помощью ЛЧМ-импульсов. Реконструкция строения морского дна, в общем случае некорректная обратная задача, может быть сведена к оценке значений параметров донных слоев, для которых целевая функция принимает минимальное значение. При этом целевая функция строится с использованием модели слоистого пространства. Использование оптимальных решающих статистик позволяет обеспечить заданную достоверность оценок глубины слоя при наблюдении сигналов, уровень которых на 15–20 дБ меньше уровня, который требуется при той же достоверности, но при использовании классической согласованной фильтрации (корреляционного метода). В рамках настоящего исследования для вычисления отраженных акустических полей в практических задачах используем известные уравнения и формулы Цеппритца. В качестве решающего правила в настоящей работе были использованы несколько вариантов целевой функции: L_2-норма, AMUSIC, а также НЕЙРО-свертка (рис. 2) [8]. Устойчивость к шумам указанных целевых функций была исследована с помощью стохастического моделирования. На рис. 2 показаны результаты оценки дисперсии и смещения оценок акустических параметров первого слоя осадков в типичных условиях мелководного шельфа в зависимости от входного отношения сигналов к шуму. Из сравнения результатов видно, что при оценке скорости в слое осадков наиболее устойчивым оказалась НЕЙРО-свертка. Однако при оценке плотности осадков наибольшей устойчивостью характеризовалась L_2-норма. Анализ структуры отраженных от слоистого морского дна

СА-сигналов с помощью модели позволяет, используя аналитические зависимости параметров сигналов, применить при решении обратной задачи проекционный метод реконструкции параметров слоистого дна. Идея такого метода состоит в последовательном оценивании параметров сначала первого от поверхности дна слоя, потом следующего слоя, оценка которого получается с использованием оценки верхнего слоя, и так далее. Такая процедура позволяет оптимизировать траекторию поиска соответствующего общему решению глобально экстремума в многомерном пространстве наблюдаемых параметров донных слоев.

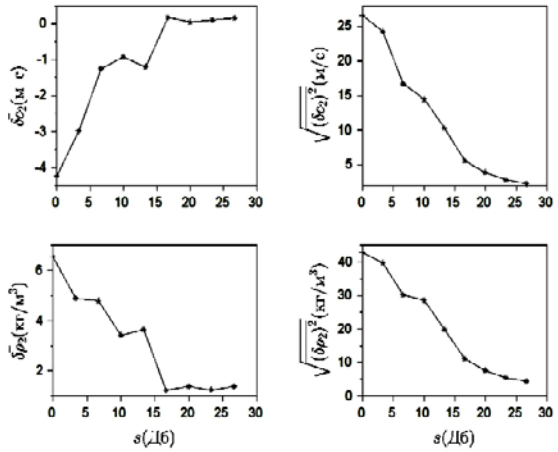


Рис. 3. Средние по 100 независимым реализациям сигнальных матриц отклонения $\langle \delta c_1 \rangle$ и $\langle \delta \rho_1 \rangle$, а также их стандарты $\left\langle (\delta c_1)^2 \right\rangle^{1/2}$, $\left\langle (\delta \rho_1)^2 \right\rangle^{1/2}$ для различных значений отношения сигнал/шум на входе приемной системы

На рис. 3 показаны результаты оценивания параметров второго жидкого слоя ($\overline{\rho}_1 = 1051$ кг/м^3 и $\overline{c}_1 = 1500{,}5$ м/с) в модели осадочного слоя морского дна при использовании решающего правила AMUSIC и приеме сигналов горизонтальной антенной длиной 100 и 300 м, на частоте 100 Гц, при уровне шумов 25 дБ. Точность оценки второго слоя падает с уменьшением точности оценки параметров верхнего слоя, которая зависит от отношения сигнал/шум на входе приемной системы. По мере повышения номера оцениваемого слоя (увеличения глубины его залегания) ошибки при реконструкции нарастают, и реконструкция с заданной достоверностью становится невозможной.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-02-00128).

Литература

1. *Grossberg S.* Adaptive pattern classification and universal recoding: feedback, oscillation, olfaction and illusions // Biological Cybernetics. 1976. V. 23. P. 187–207.

2. *Carpenter G., Grossberg S.* A massively parallel architecture for a self organizing neural pattern recognizing machine // Computer Vision, Graphics, and Image Understanding. 1987. V. 37. P. 54–115.

3. *Fukushima K., Miyake S.* Neocognitron: a new algorithm for pattern recognition tolerant of deformation and shifts in position // Pattern Recognition. 1982. V. 15. P. 455–469.

4. *Мастеров А.В., Рабинович М.И., Толков В.Н., Яхно В.Г.* Исследование режимов взаимодействия автоволн и автоструктур в нейроподобных средах // Коллективная динамика возбуждений и структурообра-зование в биологических тканях. Горький : ИПФ, 1988. С. 89–102.

5. *Belliustin N.S., Kuznetsov S.O., Nuideil I.V., Yakhno V.G.* Neural networks with close nonlocal coupling for analyzing composite images // Neurocomputing. 1991. V. 3. P. 231–246.

6. *Khobotov A., Khilko A., Yakhno V.* Analysis of advantages of neuron-like systems in the procedure of signal comparison-measure calculation // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2008. V. 17, № 4. P. 299–307.

7. *Nicolis J.S.* Dynamics of hierarchical systems an evolutionary approach. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 1986.

8. *Смирнов И.П., Калинина В.И., Хилько А.И.* Анализ робастности алгоритмов сейсмоакустической реконструкции морского дна // Труды XXIII научной конференции по радиофизике. Н. Новгород : ННГУ, 2019. С. 231.

Информационный подход к цифровой регистрации сигналов

А.Г. Хоботов, А.И. Хилько, А.А. Тельных

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
email: algenn3@gmail.com

Введение

В современных системах цифровой обработки сигналов существует ряд задач, не требующих точного количественного измерения характеристик исследуемых сигналов. Существенным, однако, является «регистрация» характерных особенностей формы сигнала для дальнейшего сопоставительного анализа. При этом желательно, чтобы выходной цифровой код был «минимально избыточным».

В основу определения количественных характеристик понятия информации заложены соображения, сформулированные Клодом Шенноном в 1948 г. Именно энтропию Шеннона: $H(M) = -\sum_{\forall i} P(M_i)\log_2(P(M_i))$ (бит) (основание логарифма принимают равным 2) и будем использовать для анализа сигналов.

Разность априорной и апостериорной энтропий называется количеством информации $I = H^{\text{apr}} - H^{\text{apost}}$, или шенноновской информационной мерой. Это мера, характеризующая устранение неопределенности в исследуемом процессе или состоянии объекта или системы в результате наступления некоторого события, определившего состояние исследуемого объекта или значения параметров, характеризующих это состояние. Количество информации ансамбля полностью неопределенных событий, определяемых несколькими независимыми источниками, равно суммарной энтропии этих источников, так как после полного определения состояния всех источников суммарная энтропия их равна 0:

$$I(M) = \left[-\sum_{\forall i} P(M_i^{\text{apr}})\log_2(P(M_i^{\text{apr}}))\right] - \left[-\sum_{\forall i} P(M_i^{\text{apost}})\log_2(P(M_i^{\text{apost}}))\right] = H(M^{\text{apr}}).$$

$$\underset{0}{\underset{||}{}}$$

$I(M)$ трактуется как мера уменьшения неопределенности, связанной с наступлением некоторого события M.

1. Информационная энтропия непрерывного распределения, дифференциальная энтропия

Энтропия непрерывного распределения определится при выражении дискретных вероятностей через плотность непрерывного распределения $f(x)$. Определим $P_i = f(x_i)\Delta x_i$ и подставим правую часть в формулу для энтропии:

$$H^c = -\sum_{i=1}^{N}\left[f(x_i)\Delta x_i\right]\cdot\left\{\log_2\left[f(x_i)\Delta x_i\right]\right\}.$$

Проведя некоторые преобразования и перейдя к пределу при $N \to \infty$ и $\Delta x_i \to 0$, получим

$$H^c = -\int f(x)\underbrace{\log_2 f(x)dx}_{dH} + \underbrace{\left[\lim_{\Delta x_i \to 0}(-\log_2 \Delta x_i)\right]}_{\infty} \Rightarrow \infty.$$

Это означает, что энтропия непрерывного распределения бесконечно большая, что достаточно очевидно, так как в системе с бесконечно большим числом состояний требуется бесконечное число «битов» для их представления [1].

Величину dH называют дифференциальной энтропией. Ясного физического смысла в силу дискретности самой природы информационной энтропии она не имеет, но ее принято использовать для аналитических оценок, имея в виду, что второе слагаемое в приведённом выше выражении для H^c не зависит от $f(x)$ и равномощно для любых распределений случайной величины $f(x)$.

2. Законы распределения с максимальной дифференциальной энтропией

Определим, какой из законов распределения $f(x)$ и при каких условиях обладает максимальной дифференциальной энтропией.

Найдем функцию $f(x)$, определенную на интервале $[-\infty, +\infty]$ с заданной дисперсией, при которой дифференциальная энтропия dH достигает максимума. Можно показать, что максимум достигается, когда функция плотности имеет вид $f(x) = \left(2\pi\sigma^2\right)^{1/2}\exp\left(-x^2/2\sigma^2\right)$, т. е. когда она гауссовская и соответствующее максимальное значение дифференциальной энтропии равно [1]

$$dH^{mg} = -\int f(x)\left(\ln f(x)\right)dx = \ln\left(\sqrt{2\pi e}\sigma\right).$$

Найдем теперь функцию $\varphi(x)$, определенную на интервале $[0, L]$, максимизирующую значение дифференциальной энтропии, при условии отсутствия каких-либо ограничений на ее моменты. Дифференциальная энтропия в этом случае запишется как $dH^{\max 2} = -\int_0^L \varphi(x)\log_2\varphi(x)dx$. Вводя необходимое условие нормировки $\int_0^L \varphi(x)dx = 1$ и составляя уравнение Эйлера, придем к $\varphi(x) = 1/L$, т. е. к равномерному распределению [4]. И соответственно максимальное значение дифференциальной энтропии в этом случае

$dH^{mc} = -\int_0^L \varphi(x)\log_2(\varphi(x))dx = \log_2(L)$. Очевидно, что в бесконечных пределах $L = \infty$ дифференциальная энтропия равномерного распределения бесконечна. Но если сравнивать нормальный и равномерный, с конечным L, законы распределения, то очевидно, что при $L > \left(\sqrt{2\pi e}\cdot\sigma\right)^{\ln 2}$ дифференциальная энтропия ограниченного равномерного распределения становится больше дифференциальной энтропии нормального с дисперсией σ.

3. Регистрация непрерывных сигналов

Регистрируемый непрерывный сигнал в этом случае представляется гипервектором в n-мерном евклидовом пространстве $(n = 2WT)$. То есть это означает, что сигнал источника $X(t)$ заменен гипервектором $\mathbf{X}(t)$ с координатами $x_1, x_2, ..., x_{2wt}$, амплитуды которых равны амплитудам сигнала $X(t)$ в моменты времени $0, 1/2W, 2/2W, ..., 2WT/2W = T$. Шум на входе тоже дискретизируем и получим гипервектор $\mathbf{N}(t)$ в том же $(2WT)$-мерном пространстве. Гипервектор шума играет роль вектора ошибки в пространстве состояний. Принятый сигнал $Y(t)$ тоже представляется гипервектором $\mathbf{Y}(t)$, и если считать шум аддитивным, то мы будем регистрировать сигнал $Y(t) = X(t) + N(t)$. Количество регистрируемой информации в этом случае запишется просто как разность между начальной неопределенностью $H(X)$ и конечной неопределенностью $H(X/Y)$:

$$I(X \to Y) = H(X) - H(X/Y) = \\ = H(Y) - H(Y/X).$$

Полагая шум статистически независимым от сигнала и считая регистрацию сигнала безошибочной, $I(X \to Y)$ определим как $I(X \to Y) = H(Y) - H(N)$, где $H(N)$ – энтропия $(2WT)$-мерного случайного процесса, $H(N) = H(n_1, n_2, ..., n_{2WT})$. Понятно, что наибольшие информационные потери (наименьшее количество регистрируемой информации) будут тогда, когда $H(N) \to \max$, но выше мы уже определили виды функции плотности вероятности с максимальной энтропией. Они должны иметь нормальный закон с заданной σ либо равномерный, с параметром L. Равенство энтропий достигается при $L \approx (4{,}133\sigma)^{0{,}693}$. Верхняя оценка энтропии принимаемого сигнала при известной его мощности определяется как $\ln\left(\sqrt{2\pi e}\sigma_Y^{\text{gaus}}\right)$ или при известном диапазоне распределения его амплитуды как $\log_2(L_Y)$. Тогда можно записать $I^{\max}(X \to Y) = H^{\max}(Y) - H^{\max}(N)$. Откуда $I_{\max}^{\text{uniform}}(X \to Y) = \log_2\left(L_Y/L_N\right)$ определяется соотношением L_Y/L_N, т. е. динамическим диапазоном сигнала $Y(t)$. (При нормальном распределении – известной мощности сигнала и шума – она определится как $I_{\max}^{\text{gaus}}(X \to Y) = \ln(\sigma_Y/\sigma_N^{\text{gaus}})$.)

Количество уровней квантования амплитуды можно определить из соотношения $H^{\max}(m) = I^{\max}(X \to Y)$. Полагая, что кодирование происходит без информационных потерь (дискретный кодированный сигнал содержит количество информации входного сигнала) или $\log_2 m = \log_2 \frac{L_Y}{L_N}$ откуда $m = \frac{L_Y}{L_N}$. Это верхняя оценка при условии неизвестной функции плотности входного сигнала и шума. Логично принять, что они имеют равномерный закон распределения. Шкала квантования амплитуды при этом «эквидистантная». Но в реальных условиях, оценивая плотность распределения сигнала $Y(t)$ и зная плотность распределения шума $N(t)$ (определяя количественное значение $H^{re}(Y)$ и $H^{re}(N)$), с учетом α-квантильного кодирования амплитуды $Y(t)$, получаем $m = \text{int}\left\{2^{H^{re}(Y) - H^{re}(N)}\right\} + 1$, так как при α-квантильном кодировании амплитуды $Y(t)$ функция плотности кодированного сигнала $Y(t)$ становится равномерной с энтропией равной, с точностью до ближайшего целого, $\log_2 m$. При неизвестной оценке $H^{re}(N)$ m определится как $m = 2^{\left[H^{re}(Y) - \log_2 L_N\right]}$.

Рассмотрим теперь задачу об определении уровней квантования амплитуды сигнала, максимизирующих количество информации в коде относительно входного сигнала $X(t)$ в [4]. Количество информации относительно $X(t)$, содержащееся в дискретном сигнале $\mathbf{Y}(t)$, как записано выше, равно:

$$I(X \to Y) = H(Y) - H(Y/X),$$

где $H(Y)$ – безусловная энтропия сигнала $\mathbf{Y}(t)$ – запишется как $H(Y) = -\sum_{i=0}^{m-1} P(Y_i)\log_2 P(Y_i)$;

$P(Y_i)$ – вероятность дискретного сигнала $Y(t) = X(t) + N(t)$ относительно уровней квантования X_i равна: $P(Y_i) = \int_{X_i}^{X_{i+1}} P(Y)dY$;

$H(Y/X)$ – условная энтропия $\mathbf{Y}(t)$ относительно $X(t)$ – запишется как $H(Y/X) = -\int P(X)\sum_{i=0}^{m-1} P(Y_i/X)\log_2 P(Y_i/X)dX$;

$P(Y_i/X)$ – условная вероятность регистрации величины Y_i при условии, что входной сигнал равен X:

$$P(Y_i/X) = P(X_i < Y < X_{i+1}) = \\ = P(X_i - X < N < X_{i+1} - X) = \int_{X_i - X}^{X_{i+1} - X} P(N)dN.$$

Поскольку **Y**(t) есть измеримая функция $Y(t)$ [2], то положительная разность **Δ = I(X→Y) – – I(X→Y)** может трактоваться как информационные потери квантования. Таким образом, выбирая уровни квантования X_i так, чтобы **I(X→Y)** была максимальна, мы минимизируем информационные потери на квантование.

Значения уровней X_i, максимизирующих **I(X→Y)**, находятся из уравнения

$$\frac{d\left[H(Y)\right]}{dX_i} - \frac{d\left[H(Y/X)\right]}{dX_i} = 0 .$$

Подставляя в выражения для энтропий приведенные выше выражения и дифференцируя их по X_i, при условии, что функция плотности $P(X)$ на диапазоне шумовой составляющей меняется медленно или имеет симметричный вид, получим

$$\frac{d\left[H(Y/X)\right]}{dX_i} = \frac{P(\vec{X})}{L_N}\left(-\frac{L_N}{\ln 2}\right) - \frac{P(\vec{X})}{L_N}\left(-\frac{L_N}{\ln 2}\right) = 0,$$

где $P(\vec{X}_i)$ – значения функции плотности в некоторых точках диапазонов интегрирования [3].

Отсюда уравнение $\frac{d\left[H(Y)\right]}{dX_i} - \frac{d\left[H(Y/X)\right]}{dX_i} = 0$ сводится к уравнению $\frac{d\left[H(Y)\right]}{dX_i} = 0$, решением его являются X_i, при которых функция плотности $P(X)$ = 0, а также X_i, представляющие собой α-квантили функции плотности $P(Y)$:

$$\int_{X_{i-1}}^{X_i} P(Y)dY = \int_{X_i}^{X_{i+1}} P(Y)dY.$$

4. Результаты моделирования «шумовых» сигналов

Для оценки информационных характеристик равномерного и нормального шума приведем результаты моделирования ЛЧМ-сигнала, искаженного равномерным и нормальным шумом, параметры которых связаны соотношением $L_e = (\sqrt{2\pi e}\sigma_g)^{\ln 2}$ (для моделирования использовался пакет MATCAD).

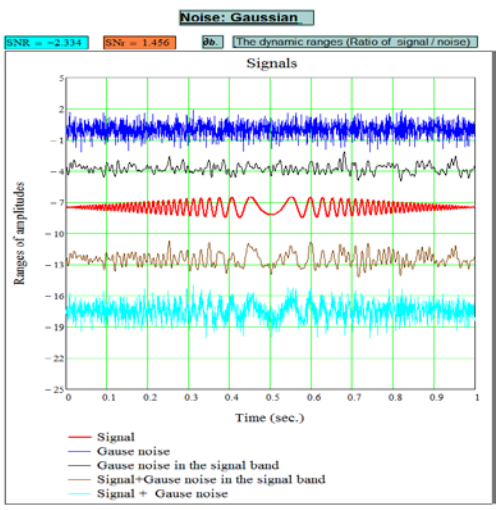


Рис. 1

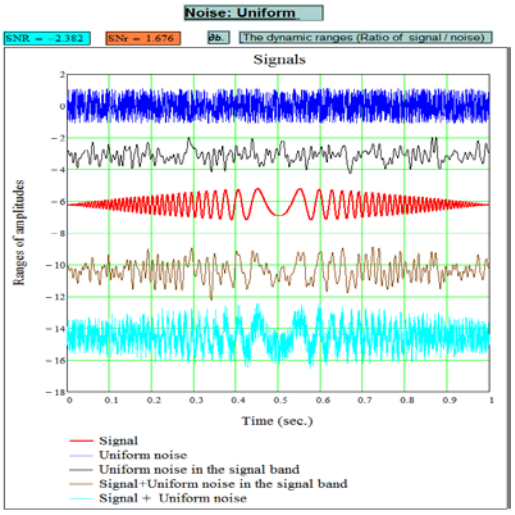


Рис. 2

На рисунках 1 и 2 представлены SNRn и SNRe – динамические диапазоны (отношение «сигнал/шум») ЛЧМ-сигнала с нормальным (рис. 1) и равномерным (рис. 2) аддитивным шумом. По результатам моделирования видно, что оценки отношения «сигнал/шум» сигналов примерно совпадают при соотношении параметров $L_e = (\sqrt{2\pi e}\sigma_g)^{\ln 2}$.

5. Определение оптимальных параметров квантования амплитуды видеосигнала

Параметры системы кодирования (количество разрядов АЦП) определяются величиной аналогового шума и величиной области насыщения телевизионного датчика. В соответствии с приведенным

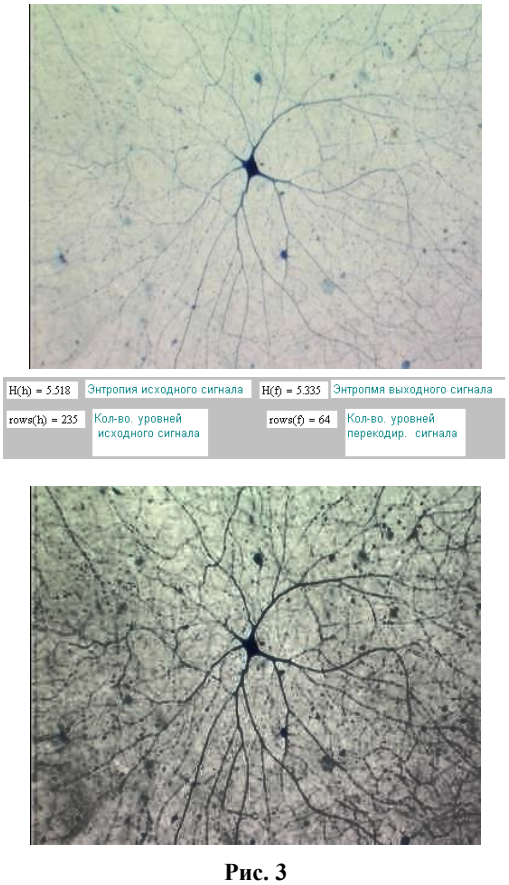


Рис. 3

выше соотношением количество уровней квантования определяется как $m = \left[L_Y / L_N \right]$, m – количество уровней квантования видеосигнала, L_Y – диапазон распределения амплитуды формируемого видеосигнала прибора, L_N – диапазон распределения шума. Шкала сигнальных отсчетов определяется нулями и квантилями функции распределения амплитуды на кадре. Результаты применения данной процедуры кодирования представлены на рис. 3.

Вверху на рис. 3 исходное изображение, внизу изображение с перекодированной амплитудной составляющей. Количество уровней представления амплитуды сигнала после перекодирования уменьшилось с 256 уровней до 64 с примерно совпадающими оценками энтропий.

Литература

1. *Nicolis J.S.* Dynamics of hierarchical systems an evolutionary approach. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 1986.

2. *Ковалеров Г.И., Мандельштам С.М.* Введение в информационную теорию измерений. М. : Энергия, 1974.

3. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1977.

4. *Хоботов А.Г., Лысов В.И.* Разработка алгоритмов и систем оптимального квантования амплитуды телевизионных сигналов в системах технического зрения промышленных роботов // Электронная техника. Серия 7. 1987. Вып. 4 (143).

Соотнесение субъективного восприятия цвета и порогов цветоразличения с уровнем тревожности человека

Л.А. Хрисанфова, Д.А. Шивоева

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
email: l.hri@mail.ru; ms.shivoeva@mail.ru

Давно известно, что устойчивые эмоциональные особенности человека имеют определенную связь с его цветовыми предпочтениями. Однако имеющиеся данные психологических исследований в этой области свидетельствуют о неоднозначности в оценках данного феномена. Кроме того, активно исследуются пороги цветоразличения, которые на психофизиологическом уровне определяют чувствительность человека к тому или иному цвету. В литературе имеется немало данных о том, что серьезные отклонения в эмоциональной сфере, характерные, например, для состояния депрессии, а также текущие эмоциональные состояния (стресс, ситуативная тревога) у здоровых людей приводят к изменениям цветовой чувствительности [2, 3, 6]. Также известно, что такая устойчивая эмоциональная характеристика индивида, как личностная тревожность, измеренная при помощи методики Спилбергера, также находит отражение в порогах цветоразличения [3].

В этой связи достаточно актуальным становится вопрос о взаимосвязи между показателями цветоразличения и характером отношения (цветовыми предпочтениями) человека к цвету. Ответ на этот вопрос позволит расширить перспективы в понимании организации разных уровней психики, реализовать их в психодиагностической практике. Однако обзор литературных источников показывает, что не существует однозначной связи между измерениями цветовой чувствительности и цветовыми предпочтениями: физиологическая чувствительность не тождественна субъективному психологическому предпочтению [6]. Предпринятое нами исследование предполагает изучение взаимосвязей между физиологической цветовой чувствительностью, субъективным восприятием цвета и устойчивыми эмоциональными особенностями человека. Результаты, предъявленные в данной статье, представляют собой начальные данные в рамках данного исследования.

Цель данного исследования – соотнесение личностной тревожности человека с субъективным восприятием цвета, некоторыми характеристиками эмоциональной сферы, связанными с субъективным восприятием цвета, и с порогами цветоразличения.

В качестве субъективного отношения к цвету в данном исследовании рассматривалось предпочтение какого-либо цвета, который испытуемый, раскладывая карточки Люшера, определял на первое место. В качестве исследуемых эмоциональных характеристик в данной работе представлены нервно-психическая устойчивость, наличие тревог, энергетическая установка (активность-пассивность), эмоциональная чувствительность и выраженность стрессовых реакций испытуемого, которые измерялись при помощи методики цветовых отношений М. Люшера.

Нервно-психическая устойчивость в данной методике измеряется через показатель «суммарное отклонение от аутогенной нормы». Суммарное отклонение от аутогенной нормы, согласно М. Люшеру, является индикатором нервно-психического благополучия, о котором свидетельствуют низкие значения данного показателя. Нервно-психическое благополучие характеризуется эмоциональной устойчивостью, энергичностью, деятельностью, уверенностью. Соответственно, при высоких значениях суммарного отклонения от вегетативной нормы наблюдаются непродуктивная напряженность, зажатость, нестабильность, утомляемость, преобладание негативных и астенических переживаний.

Наличие тревог и самозащитного поведения, о котором свидетельствует наличие компенсаций, измеряется в методике М. Люшера через «показатель суммы компенсаций и тревог». Энергетическая установка (активность-пассивность) испытуемого по методике М. Люшера измеряется через показатель «вегетативный компонент». Эмоциональная чувствительность и выраженность стрессовых реакций обусловливает определенный расклад цветовых карточек Люшера (сочетание цветов).

Методика исследования

В эксперименте использовались следующие методики.

Уровень тревожности измерялся при помощи шкалы Дж. Тейлора (адаптация В.Г. Норакидзе) [5].

Субъективное отношение к цвету и некоторые характеристики эмоциональной сферы определялись при помощи ТЦО М. Люшера [1].

Пороги цветоразличения измерялись при помощи метода компьютерной цветовой кампиметрии. Данный метод представляет собой технологию измерения дифференциальных порогов по координатам цветовых моделей в виртуальной компьютерной среде. Методика позволяет вычислять верхний порог различения цвета (dH+), нижний порог различения цвета (dH–), а также разницу между ними для каждого стимула. Подробное описание методики можно найти в работе С.А. Полевой [3, 4].

Процедура исследования

В двух выборках для каждого испытуемого индивидуально определялись уровень тревожно-

сти бланковым методом, характеристики эмоциональной сферы при непосредственном проведении ТЦО М. Люшера. Также индивидуально проводилось измерение порогов цветоразличения в компьютерной среде на веб-платформе APWAY. В дальнейшем по полученным показателям выборки сравнивались между собой.

В качестве математической базы исследования выступили методы описательной статистики и сравнения средних для независимых выборок с использованием критерия Манна – Уитни.

Испытуемые

Выборка 1: пожарные различных подразделений города в количестве 79 мужчин (M = 35,9 лет, SD = 9).

Выборка 2: студенты Института информационных технологий, математики и механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского в количестве 54 юношей (M = 19 лет, SD = 1).

Выбор групп испытуемых был продиктован задачей изучения особенностей эмоциональной сферы, которая, согласно нашим предположениям, имеет свою специфику в зависимости от профессиональной направленности испытуемых. Различие по возрастному составу выборок испытуемых в данном исследовании не оказало никакого влияния на полученные результаты, поскольку тревожность в выборке пожарных выражена равномерно по всем возрастам (пожарные от 20 до 25 лет: тревожность M = 9,3 балла, пожарные от 26 до 30 лет: M = 8,5, пожарные от 31 до 50 лет: тревожность M = 8,6, пожарные свыше 50 лет: M = 11, достоверных различий между данными подгруппами по уровню тревожности не выявлено). Пожарных до 30 лет в выборке 39 %, свыше 50 – всего 12 %.

Результаты и их обсуждение

Прежде всего был проведен сравнительный анализ выборок (пожарных и математиков) на предмет выраженности тревожности. Согласно интерпретации автора методики по определению уровня тревожности, существует пять уровней выраженности тревожности, в рамках которых поведение людей значимо различается: очень высокий (40–50 баллов), высокий (25–39), средневысокий (15–24), средненизкий (5–14), низкий (0–4). Выборки пожарных и математиков различаются по выраженности тревожности у их представителей. Среди математиков испытуемые с высоким уровнем тревожности (M = 29) составляют 20 % от всей выборки, с уровнем средневысоким (M = 17) – 35 %, с уровнем средненизким (M = 10) – 43 %, а с низким уровнем тревожности (M = 4) присутствует только один человек, что составляет 1,9 % от всей выборки. Среди пожарных испытуемые с очень высоким и высоким уровнем тревожности полностью отсутствуют, с уровнем средневысоким (M = 18) – только три человека (4 % от выборки), с уровнем средненизким (M = 9) – 93 %, с низким уровнем тревожности (M = 3) – только два человека (3 % от всей выборки). Подобное распределение позволяет утверждать, что выборка пожарных является гомогенной по уровню тревожности и характеризуется средненизким уровнем тревожности. Выборка математиков по уровню тревожности сдвинута в сторону высоких значений (высокий и средневысокий уровень тревожности имеют 64 % испытуемых). В связи с найденными особенностями выборок по уровню тревожности дальнейший анализ будет осуществлен в основном на выборке математиков. Выборка пожарных будет сравниваться только с той подгруппой выборки математиков, представители которой имеют средненизкий уровень тревожности.

Результаты, показывающие распределение порогов цветоразличения в связи с уровнем тревожности математиков, показаны в таблице.

Пороги различения цветов в связи с уровнем тревожности (выборка математиков)

Уровень тревожности	R dH+	G dH+	B dH+	R dH–	G dH–	B dH–
Высокий	3,9*	5,4*	3,6*	5,8*	4,9	1,6*
Средне-высокий	5,3*	8,8*	5,8*	1,5*	5,3	1,9
Средне-низкий	5,5	7,7	4,5	4,5*	6,6	3,5*

Примечание: * – значимые различия.

На выборке математиков были обнаружены значимые различия между группами с различными уровнями тревожности и порогами цветоразличения. Как видно из таблицы, испытуемые с высоким уровнем тревожности характеризуются низкими верхними порогами различения синего, зеленого и красного цветов по сравнению с испытуемыми со средневысокой тревожностью (Манн – Уитни U = 33,0, p = 0,038, U = 20,0, p = 0,005, U = 33,0, p = 0,039 соответственно). Причем у высоко тревожных испытуемых верхний порог различения зеленого цвета значимо выше синего и красного (U = 12,0 при p = 0,002, U = 17,0 при p = 0,01 соответственно). Обнаружено, что с увеличением уровня тревожности снижается верхний порог различения для красного цвета, т. е. увеличивается чувствительность к красному цвету, но значимые различия начинают наблюдаться только на высоком уровне тревожности.

Полученные нами результаты согласуются с данными, полученными С.А. Полевой, в работах которой показано, что испытуемые с высокой личностной тревожностью, измеренной при помощи методики Спилбергера, обладают высокой чувствительностью к синему цвету [2, 3].

Стоит отметить очень интересный факт: высоко тревожные испытуемые и испытуемые со средненизкой тревожностью обладают сниженными верхними порогами различения по зеленому и синему цветам по сравнению с испытуемыми со средневысокой тревожностью (см. таблицу). Однако значимые различия для испытуемых со средненизкой тревожностью не были получены. По-

видимому, имеет значение общая чувствительность ко всему цветовому диапазону, которая у высоко тревожных испытуемых выше, чем у всех остальных

Пожарные показали результаты соотношения уровня тревожности и порогов цветоразличения, очень близкие к результатам математиков со среднизкой тревожностью. Внутри выборки пожарных не было найдено никаких значимых различий по порогам цветоразличения.

Что касается субъективного отношения к цвету, то здесь данные распределились совершенно не связанно с градациями уровня тревожности. Прежде всего, выборка разделилась на две части: испытуемые с тревожностью выше 16 баллов и ниже 15 баллов. Группы различаются по субъективному отношению к черному цвету (U = 467,5, p = 0,031). Тревожные испытуемые чаще выбирают черный цвет в качестве приоритетного. По субъективному отношению к остальным цветам значимых различий не было получено, хотя наблюдалась тенденция к предпочтению синего и фиолетового цветов у испытуемых с высокой тревожностью. Вероятно, увеличение числа высоко тревожных испытуемых может дать значимые различия.

По эмоциональной чувствительности и выраженности стрессовых реакций были получены следующие данные. Среди высоко тревожных математиков было обнаружено 64 % испытуемых с ярко выраженным стрессом, 58 % математиков со средневысоким уровнем тревожности характеризуются высокой эмоциональной чувствительностью. Среди пожарных эмоционально чувствительных испытуемых было обнаружено всего 18 %, а вот людей с ярко выраженным стрессом оказалось 65 %.

Что касается таких характеристик эмоциональной сферы, как нервно-психическая устойчивость, активность-пассивность, наличие тревог и самозащитного поведения (по методике М. Люшера), то распределение значений этих показателей по группам с различным уровнем тревожности оказалось достаточно равномерным.

Выводы

Высоко тревожные испытуемые значимо более чувствительны ко всему цветовому диапазону. Наиболее чувствительны высоко тревожные испытуемые к синему цвету.

Испытуемые со средневысокой тревожностью наиболее чувствительны к красному цвету и различают больше оттенков красного.

Эмоциональная чувствительность больше характерна для испытуемых со средневысоким уровнем тревожности.

Ярко выраженный стресс больше наблюдается у высоко тревожных математиков и фактически у всех пожарных.

Заключение

Выделение уровней личностной тревожности, принятое в психодиагностике, соотносится с порогами различения цветов. Что касается субъективного отношения к цвету, то значимые результаты на данной выборке удалось получить только для черного цвета, причем субъективное отношение к цвету не соотносится с уровнями тревожности человека, принятыми в психодиагностике, а различается только для тревожности выше среднего значения и ниже среднего значения.

Эмоциональная чувствительность человека (в понимании М. Люшера) и тревожность являются родственными категориями, которые пересекаются в зоне средних значений тревожности. Выраженность стрессовых реакций характерна для людей с высоким уровнем тревожности либо определяется характером профессиональной деятельности.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-013-00828 «Индивидуально-психологические предикторы обнаружения эмоциональных объектов в микроинтервалах времен».

Литература

1. *Люшер, М.* Цвет вашего характера. М. : РИПОЛ классик,1997. 240 с.

2. *Плишек, Н.К.* О некоторых особенностях выбора цветов и сенсомоторных реакциях на световые стимулы различной модальности при изменении эмоционального состояния // Диагностика психического состояния в норме и патологии. Л., 1980. С. 135–140.

3. *Полевая, С.А.* Интегративные принципы кодирования и распознавания сенсорной информации. Особенности осознания световых и звуковых сигналов в стрессовой ситуации // Вестник НГУ. Серия: Психология. 2008. Т. 2, вып. 2. С. 106–117.

4. *Стромкова, Е.Г. [и др.].* Влияние стрессовой ситуации на дифференциальные пороги восприятия цвета // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Серия «Социальные науки». 2004. Вып. 1(3). С. 46–56.

5. *Шапарь, В.Б.* Практическая психология : инструментарий. Ростов-на-Дону : Феникс, 2004. 768 с. (Серия «Учебники высшей школы»).

6. *Шварц, Л.А.* Изменения цветоощущения в эмоциональных состояниях // Проблемы физиологической оптики. М., 1948. Т. 6. С. 314–320.

Что скрывает нейродинамика мозга? (Современные данные и модель)

В.Д. Цукерман

Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского ЮФУ, Ростов-на-Дону
email: vtsukerman17@yandex.ru

Принципиально важными для понимания когнитивной деятельности мозга являются нейродинамические явления, обнаруженные современной экспериментальной нейронаукой, в том числе тета-гамма-фазоамплитудная связанность мозговых ритмов [1], баланс возбуждения и торможения [2], растормаживание [3, 4], избирательное рекрутирование нейронов в распределенные схемы памяти [5, 6]. Сенсорные и высокоуровневые представления в мозге являются *распределенными и перекрывающимися,* что имеет важные последствия для обучения и памяти. Эффективность и надежность таких представлений заключается в том, что мозг может не только сэкономить большое количество полезной информации, но и совместно использовать свой физический субстрат – синапсы, нейроны и ансамбли в решении множества когнитивных задач. С использованием общих признаков может существовать практически бесконечное число категорийных представлений в мозге [7]. В большинстве работ гиппокамп ассоциируется с обучением, хранением и вызовом эпизодической и, в частности, пространственной памяти. Напомним, что Нобелевские премии 2014 года были вручены именно за открытие «решетчатых клеток» и «клеток места» в гиппокампальной формации и отнесение последней к носителям когнитивной карты окружения в мозге. Однако анализ современных данных fMRI и наши модельные эксперименты говорят о возможности значительно более сложной гиппокампальной функции, чем просто кодирование отдельных эпизодов пространственного поведения, а именно о формировании концептуальных знаний.

Нейронаучные открытия, сделанные в последние годы, требуют глубокого осмысления и, что не менее важно, их практической реализации в сетевом модельном выражении. В настоящей работе представлена микросхемная организация сетей с четным циклическим торможением (ECI-сети). Хотя архитектура ECI-сетей не является точной анатомической копией тормозных интернейронных сетей мозга, а отражает в определенном функциональном смысле эквивалентную схему нейронной организации таких сетей, она позволяет реализовать целый ряд когнитивных функций, включая внимание, кодирование и вызов эпизодов рабочей памяти, концептуальное обучение и категоризацию высокоуровневых представлений на основе вышеперечисленных нейродинамических феноменов. Важно подчеркнуть, что перечисленные функции нейродинамически взаимосвязаны и совместно реализуются на сетевом уровне. Изменения в сетевом поведении возникают из-за постоянного структурного изменения сети вследствие эффекта растормаживания, рекрутирования тех или иных нейронов для решения конкретных поведенческих задач или через изменения в возможных состояниях взаимодействия среди узлов сети (эффект метапластичности). Функциональные последствия этих эффектов приводят к ряду важных заключений: а) один нейрон может быть вовлечен в больше чем одно нейродинамическое поведение сети, б) одно поведение может включать несколько схем и в) одно целевое задание сети может изменить многочисленные схемы. Участие этих различных способов в реконфигурации сетевого поведения изменяется согласно размеру системы и репертуару ее функциональных состояний. Это соответствует известному выводу о том, что, когда количество нейронов/схем и разнообразие сетевых компонентов увеличивается, надежность функциональной зависимости от отдельных компонентов уменьшается.

Подробное описание архитектурных особенности сетей с четным циклическим торможением можно найти в наших ранних работах [8, 9], а здесь мы остановимся на ряде фундаментальных результатов, полученных впервые с использованием последних нейробиологических данных. Напомним вкратце, что в схеме сети нейроны, получающие специфические CW- и CCW-сигналы угловой скорости движения виртуального организма, выделены на схеме ECI-сети соответствующими цветами (рис. 1), а сами углы при интегрировании траектории движения отсчитываются от правой оси симметрии (диагонали) решетки, которая совпадает с фронтальным направлением движения тела. Все информационные единицы с началом движения получают на своих входах неспецифические сигналы поступательной скорости движения, которые одновременно определяют изменения состояния сети. Считывание популяционных фазовых кодов выполняется простым линейным декодером. Ориентация частных сегментов траектории оценивается как взвешенная линейная сумма отрезков кривых фазовых ответов нейронов в процессе интегрирования данного эпизода в текущем состоянии сети, а полная траектория эпизода соответствует векторной сумме всех сегментов во всех состояниях сети.

На рис. 1 представлены результаты обучения пространственному эпизоду «выступ» (обход препятствия) при интегрировании траектории вдоль фронтального направления движения навигатора. В первом ряду слева направо показан рекрутированный в кодирование рабочей памяти кластер клеток, кривые фазовых ответов всех

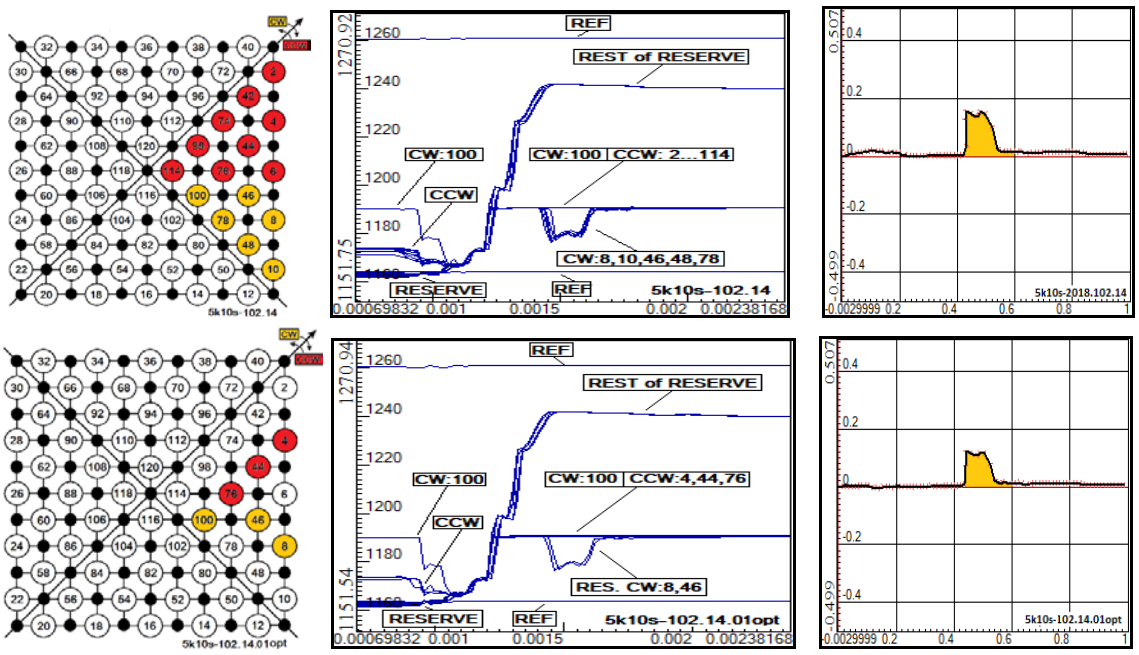


Рис. 1. Обучение категории «выступ» рекрутированием в кодирование исходного кластера клеток сети (верхний ряд) и пример оптимизированной по числу малой группы нейронов (нижний ряд) при обучении данной категории (слева на схеме). В центре тета-гамма-фазоамплитудное динамическое кодирование соответствующими нейронами и вызов из памяти «ментальных» пространственных представлений траектории (правая колонка), полученные в результате обучения той же группы нейронов. Эпизод представлен входной последовательностью 10 сегментированных градиентных сигналов {0.0033↑CCW [94] 0.0033↓CCW}, [94] {0.0034↓CW[76]0.0034↑CW}, [95] {0.0034↑CCW[94] 0.0034↓CCW}, [94] {0.0034↓CW[75] 0.0034↑CW}, [94] {0.0034↑CCW [102] 0.0034↓CCW}. В квадратных скобках – временные интервалы; цифровые значения со стрелками – начальные значения амплитуд градиентов с указанием направления градиентов вдоль нумерации нейронов сети. В RESERVE входят все неактивированные CW- и CCW-сигналами нейроны, а также нейроны, получившие слабые, подпороговые входные сигналы. В процессе нелинейной обработки все резервные нейроны занимают наиболее поздние фазы в референтном тета-цикле (REST of RESERVE). Треки памяти эпизода получены внешним слоем – сетью прямого распространения (на схеме не показана), реализующей операцию простой линейной регрессии

нейронов сети в результате обучения данному эпизоду (в центре) и «ментальное» (имплицитное) пространственное представление (трек памяти) при считывании кода из того же кластера клеток. Во 2-м ряду на рис. 1 видно, что обучением даже малой группы рекрутированных нейронов из исходного кластера клеток можно получить трек памяти эпизода «выступ». Можно показать, что в данной сети можно получить целый ряд морфированных представлений, т. е. менее детальных в отношении конкретных особенностей физического стимула, но это позволяет обобщить их на большое количество эпизодов, принадлежащих одной и той же категории, в данном случае «выступ», а сами клетки оптимизированных малых групп в схеме сети назвать «концепт-клетками», поскольку они однозначно определяют абстрактное понятие «выступ» целевой прямолинейной траектории. Сегментированные позитивные и негативные динамические смещения фазовых кривых (в центре на рис. 1) приводят к соответствующим пространственным смещениям треков рабочей памяти в правой колонке того же рисунка.

Далее рассмотрим обучение композиции из двух противоположно направленных выступов траектории, т. е. более сложную категорию, которую назовем пространственным эпизодом «зигзаг». Для этого используем показанную на схеме сети (рис. 2) группу клеток, включая один из ранее полученных примеров нейронных представлений простого эпизода «выступ», в частности концепт-клетки, выделенные цветом на схеме сети во втором ряду рис. 1. Эпизод представлен последовательностью 10 сегментированных градиентных сигналов на входах избранных нейронов сети (см. таблицу).

Считывание кода разреженных сетевых единиц при вызове из памяти комбинированного эпизода демонстрирует изоморфность его пространственных представлений (рис. 3). Даже для показанной здесь малой 5-контурной ECI-сети существует большое количество разреженных и распределенных как ипси-, так и билатеральных групп информационных единиц, которые демонстрируют категорию «зигзаг».

Таким образом, два примера концептуального обучения ECI-сети подтверждаются изоморфными треками «выступ» и «зигзаг», каждый из которых соответствует целым категориям представлений пространственных треков с многочисленными метриками длины и ширины. Можно привести и другие примеры кодирования комбинированных представлений пространственно-временных паттернов сигналов и их вызова из памяти небольшими разреженными группами концепт-клеток. Подчеркнем, что абстрактное высокоуровневое представление данных эпизодов пространственного поведения менее детально в отношении специфических признаков физического окружения, но

Временные интервалы поступления входных сигналов на рекрутированные в кодирование нейроны сети

1 CCW	2 CCW	3 CW	4 CW	5 CCW	6 CCW	7 CW	8 CW	9 CCW	10 CCW
351 - 354	448 - 451	545 - 548	624-627	722 -725	819 - 822	916 - 919	994 - 997	1091 - 1094	1172 - 1175
4, 44, 76, 102	4, 44, 76, 102	100, 104, 116	8, 46, 82, 100, 104, 116	4, 44, 76, 102	4, 44, 76, 102,	8, 46, 82, 100, 104, 116	8, 46, 82	4,102	4, 12, 14, 50, 52, 80, 102

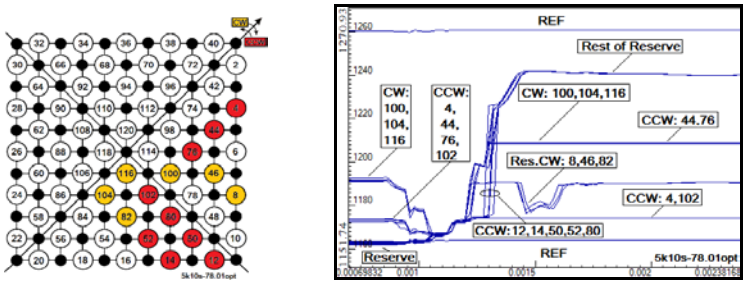


Рис. 2. Обучение категории «зигзаг» рекрутированием
в кодирование рабочей памяти выделенных цветом клеток сети.
Справа кривые фазовых ответов всех нейронов сети в процессе обучения

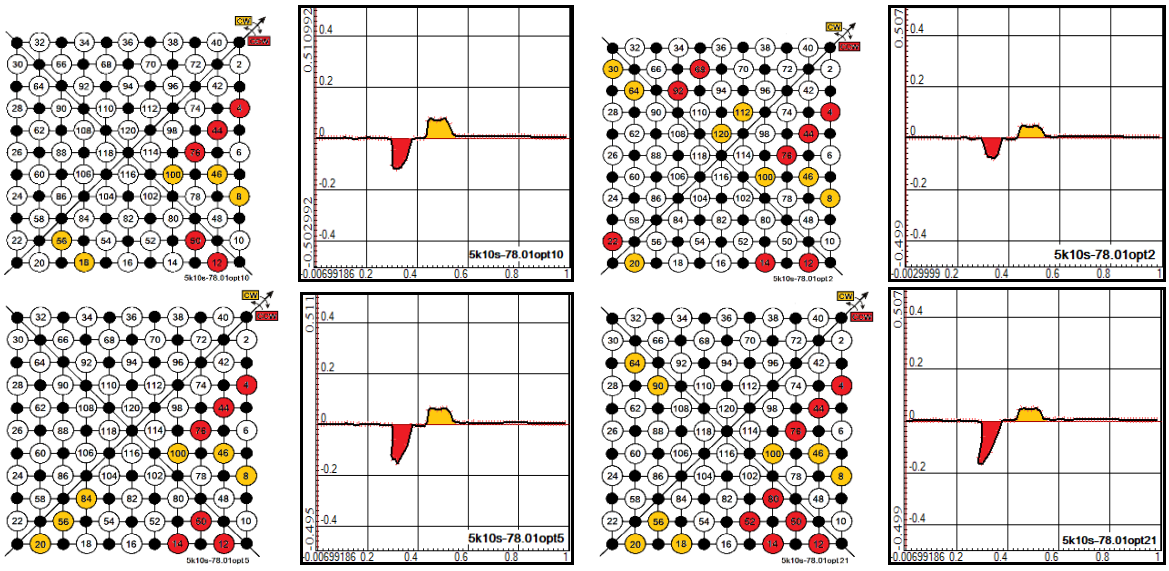


Рис. 3. Разреженные схемы считывания (вызова из памяти) распределенных представлений эпизода «зигзаг». Слева – два примера треков, полученных считыванием кода ипсилатеральных концепт-клеток; справа – примеры треков билатеральных концепт-клеток. Видно, что распределенные представления сложной категории «зигзаг» модифицируются, несмотря на то что одна и та же группа концепт-клеток простой категории «выступ» использовалась при считывании. Считывание фазового кода линейной регрессией. Здесь и ранее все пространственные треки представлены в горизонтальной плоскости и интерпретируются либо как лево-, либо как правосторонние обходы препятствий при движении вдоль целевого фронтального направления виртуального организма

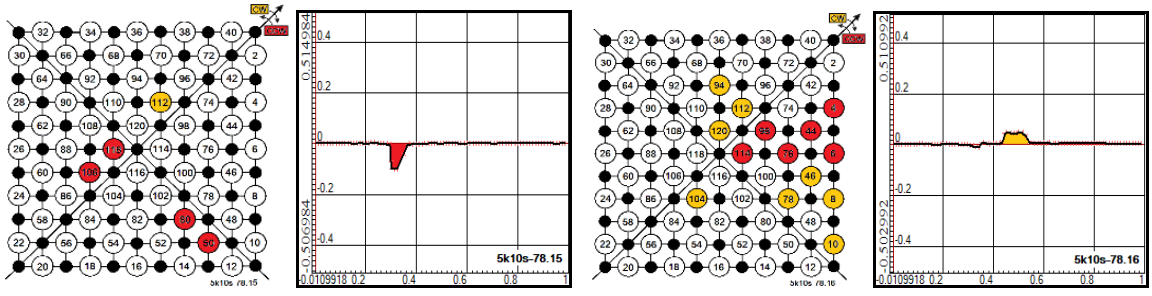


Рис. 4. Вызов из рабочей памяти избирательным вниманием правого и левого выступов траектории.
Считывание представлений из рабочей памяти сети производится
из выделенных цветом групп нейронов

позволяет сделать обобщение на большое количество объектов или эпизодов, которые имеют одно семантическое свойство, т. е. категорию.

Наличие гиппокампальных концепт-клеток, которые демонстрируют высокую избирательность к концептуальным, а не перцептуальным признакам событий подтверждается известными нейрофизиологическими данными [10]. Гиппокампальная формация не просто кодирует отдельные эпизоды; она адаптивно трансформирует изначально закодированную эпизодическую память в реляционное концептуальное знание (понятия), которое управляет новым поведением [11]. Иными словами, память того или иного эпизода не хранится в изоляции от другой, ранее существовавшей памяти, а интегрируется в уже существующие реляционные ассоциативные сети. Ключевое предсказание гипотезы Silva (2017) *«распределять для связывания»* заключается в том, что дискретные памяти, сформированные в близко расположенных интервалах, сохраняются в той же области мозга в перекрывающихся популяциях нейронов, что подтверждается нашими многочисленными модельными экспериментами с ECI-сетями.

Ключевым механизмом концептуального обучения является избирательное внимание, которое формирует ментальные представления в процессе обучения путем смещения кодирования к релевантным для концептов признакам и игнорирования нерелевантных [12]. Нисходящее внимание смещает кодирование и вызов рабочей памяти в соответствии с текущими целями. Когда цели задачи меняются, представления объектов и событий в гиппокампе могут быть организованы по-новому, приводя к обновлению концептов (понятий), которые подчеркивают наиболее важные для новой задачи признаки. Важным также является вызов из памяти ментальных пространственных представлений, что необходимо при сравнении текущей сенсорной информации для распознавания и управления поведением. Примеры такого избирательного внимания при смене задач представлены на рис. 4, где по требованию целевой задачи раздельно вызывались из памяти оба типа треков. Для выполнения двух задач необходим общий базовый когнитивный процесс, а именно рабочая память и внимание.

Как это работает алгоритмически в модели? В соответствии с изменяющимся при движении состоянием сети (горизонтальная ось рис. 1, 2 кривых фазовых ответов) происходит ритмическое смещение «внимания» от конца предыдущего к началу последующего сегмента фазовой кривой после каждого прохода всего эпизода, а полученные значения интегрируются и формируются в динамический код всего эпизода для каждого нейрона сети. В мозге же префронтальная кора настраивается на избирательное внимание к признакам, а также кодирование и вызов концепт-клеток в гиппокампе [12].

В заключение отметим, что идентичность памяти эпизодов определяется не только с позиций сетевой микросхемной организации нейронов, малые разреженные группы которых образуют концепт-клетки, но, что не менее важно, процессы перевода их из рабочей памяти к долговременному хранению осуществляются на синаптическом уровне индивидуальных нейронов. Современные данные о таких процессах, как кластеризация спинов и синаптическое мечение, дают представление о том, как память отдельных эпизодов может быть связана на субклеточном уровне [13]. Таким образом, воспоминания интегрируются во взаимосвязанные сети нейронов; тем не менее каждая память имеет свою собственную идентичность. Как мозг определяет специфическую идентичность памяти из хранящихся в перекрывающихся ансамблях клеток смешанных воспоминаний, недавно в экспериментах на мышах удалось открыть японским ученым [14]. Совместное использование клеток в треках памяти определяет связи между различными воспоминаниями, а синапс-специфическая пластичность гарантирует идентичность и хранение отдельной памяти.

Литература

1. *Lega, B. [et al.]*. Slow-theta-to-gamma phase–amplitude coupling in human hippocampus supports the formation of new episodic memories // Cer. Cortex. 2016. V. 26. P. 268–278.

2. *Dehghani, N. [et al.]*. Dynamic balance of excitation and inhibition in human and monkey neocortex // Sci. Reports, 2016. V. 6. Art. 23176.

3. *Wang, X.-J., Yang, G.R.* A disinhibitory circuit motif and flexible information routing in the brain // Curr. Opin. Neurobiol. 2018. V. 49. P. 75–83.

4. *Turi, G.F. [et al.]*. VIP-expressing interneurons in the hippocampus support goal-oriented spatial learning // Neuron. 2019. V. 101. P. 1150–1165.

5. *Rogerson, T. [et al.]*. Synaptic tagging during memory allocation // Nat. Rev. Neurosci. 2014. V. 15. P. 157–169.

6. *Josselyn, S., Frankland, P.* Memory allocation: mechanisms and function // Annu. Rev. Neurosci. 2018. V. 41. P. 389–413.

7. *Rissman, J., Wagner A.* Distributed representations in memory: insights from functional brain imaging // Annu. Rev. Psychol. 2012. V. 63. P. 101–128.

8. *Цукерман, В.Д. [и др.]*. Математическая модель пространственного кодирования в гиппокампальной формации. II. Нейродинамические корреляты ментальных траекторий и проблема принятия решений // Математическая биология и биоинформатика. Пущино : ИМПБ РАН, 2014. Т. 9, № 1. С. 216–256.

9. *Tsukerman, V.D., Kulakov, S.V.* A temporal ratio model of the episodic memory organization in the ECI-networks // Contemp. Engin. Sciences. 2015. V. 8. P. 865–876.

10. *Ison, M.J., Quiroga, R.Q. [et al.]*. Rapid encoding of new memories by individual neurons in the human brain // Neuron. 2015. V. 87. P. 220–230.

11. *Silva, A.J.* Memory's intricate web // Scientific American. 2017. V. 317. P. 30–37.

12. *Mack, M.L. [et al.]*. Dynamic updating of hippocampal object representations reflects new conceptual knowledge // PNAS. 2016. V. 113. P. 13203–13208.

13. *Rao-Ruiz, P. [et al.]*. Neuronal competition: microcircuit mechanisms define the sparsity of the engram // Curr. Opin. Neurobiol. 2019. V. 54. P. 163–170.

14. *Abdou, K. [et al.]*. Synapse-specific representation of the identity of overlapping memory engrams // Science. 2018. V. 360. P. 1227–1231.

Когнитивная урбанистика как исследование восприятия городской среды: задачи развития, состояние, перспективы

О.Н. Чеберева

Нижегородский архитектурно-строительный университет
email: chebereva@mail.ru

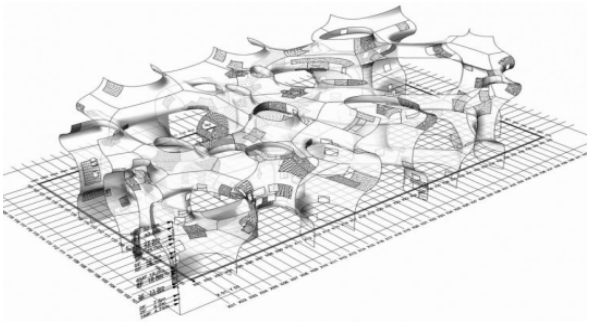
…Экологию нельзя ограничивать только задачами сохранения природной биологической среды. Для жизни человека не менее важна среда, созданная культурой его предков и им самим. Сохранение культурной среды – задача не менее существенная, чем сохранение окружающей природы.

Академик Д.С. Лихачев

Тенденции развития психолого-эстетических исследований, касающихся архитектуроведения, заложенные в конце XIX в., усилились в XX в. А. Цейзинг [1] известен трудом «Эстетические исследования», Г. Фехнер – экспериментальной эстетикой, Дж. Хембридж – изучением динамической симметрии в рядах «серебряного» и «золотого» сечения, Р. Арнхейм [2], А.В. Шаповал [3] – 0 исследованиями связи визуального восприятия и теории формальной композиции. Когнитивной психофизиологией восприятия занимались Д.Х. Хьюбел [4], Т. Визел, М. Арбиб [5].

Теория эстетического восприятия Арнхейма, основанная на когнитивной сущности процесса визуального восприятия, объединяет когнитивные и эстетические исследования. По Арнхейму, тип и форма восприятия определяют соотношение познавательных и бессознательных компонент. Специфической особенностью процесса визуального восприятия является активный характер, сопряженный с созданием визуальных моделей, таким образом, Арнхейм, фактически, следует теории П.К. Анохина. Каждый акт визуального восприятия, по Арнхейму, является активным изучением объекта, его визуальной оценкой, отбором существенных черт, сопоставлением черт со следами памяти, их анализом и организацией в целостный визуальный образ [6]. Любой вид психофизиологического исследования, использующий в качестве стимулов изображения, изучает когнитивные процессы, происходящие при визуальном восприятии, вопросы тождественности и соотношения психофизиологических и композиционных доминант.

Картину существенно меняет применение в архитектурном проектировании новых дигитальных средств компьютерного трехмерного моделирования [7, 8], предоставляющих возможности создания алгоритмов вариативного параметрического формообразования. Существующие программы используют в преобразованиях моделей диапазон математических операций от построения динамических рядов натуральных чисел и диаграмм Вороного до итераций фракталов, булевых операций, аттракторов [7, 8] и т. д. Новые возможности расчета форм и конструкций, пришедшие из авиа- и судостроения, привели к возникновению так называемой нелинейной парадигмы [8] формообразования для знаковых объектов (арх. З. Хадид, С. Калатрава, Д. Либескинд, Т. Ито, MVRDV) [9–11] в противовес вариативному параметрическому моделированию утилитарного толка (проекты промышленных, производственных, офисных и жилых объектов).



Структура здания театра, основанная на диаграммах Вороного по проекту Т. Ито

Новые технологические возможности архитектурного моделирования и проблемы роста городских агломераций ставят целый ряд задач изучения как стратегий восприятия, так и возможностей развития пространственной и функциональной среды городов [11–14] и агломераций [15–17]. Привычный сознанию архитектора XX в. плоскостной архитектурный или градостроительный анализ не может в настоящее время сообщать полноту объективных данных о качестве многократно усложнившейся предметно-пространственной среды, сценарности ее восприятия и психофизиологическом воздействии на человека. Массив объективных данных могут существенно дополнить инструментальные исследованиия предметно-пространственной среды городов, рассмотренных как совокупность визуальных и сенсомоторных стимулов для горожан.

Ключевым направлением когнитивных исследований в области архитектуры становится так называемая когнитивная урбанистика [12–15], предмет изучения которой – типология и структурный анализ городских пространств. Для когнитивной урбанистики традиционно изучение восприятия общественных пешеходных пространств и соответствующая классификация их с выходом на объемно-пространственные модели и рекомен-

дации. Основной акцент изучения – сценарность восприятия пространства [12], аналог «фреймов» в психологии, и соответствующие вопросы научно обоснованного, но не шаблонного проектирования.

К. Эллард, психолог, профессор университета Ватерлоо в Канаде, автор книги «Среда обитания: как архитектура влияет на наше поведение и самочувствие» [10], высказывает мнение, что здания, намеренно созданные для созерцания, – музеи, церкви, библиотеки – могут оказывать измеряемый положительный эффект на психологическое состояние человека. Расширился спектр инструментальных возможностей доказательства влияния архитектуры на здоровье, самочувствие, и определения условий, в которых восприятие и поведенческие реакции, психологический комфорт и адаптивность людей в пространствах города улучшаются. В этой связи определяются два основных направления результативных когнитивных исследований в области архитектуры и градостроительства:

1) вопросы психофизиологии восприятия и особенностей воздействия на зрителя отдельных архитектурных объектов, а также связи эффектов восприятия со структурно-композиционными свойствами [9–15];

2) вопросы типологии и сценарности восприятия, а затем освоения городских пространственных и планировочных структур, параметров их элементов и связевых каркасов – «фреймов» [13, 17].

Об эффективности исследований первого направления говорят результаты экспериментальной работы группы ученых под руководством доктора Х. Бермудеса (ANFA [18]) с МРТ-сканированием нейроструктур. Согласно этим данным, созерцание архитектурных шедевров вызывает изменения работы отделов мозга, сходные с происходящими при медитации, устраняет внутренний диалог, улучшает внимание, функции префронтальной коры, затылочных долей, прецентральной извилины. Зафиксировано существенное отличие физиологических параметров отклика на рядовые здания и архитектурные шедевры. Целью таких исследований является претворение неопределенности феноменологии городской архитектуры в факты нейронауки, из которых можно выводить рекомендации для проектирования.

Команда доктора Бермудеса поставила цель фиксации эффектов созерцания зданий и мест, спроектированных с эстетической доминантой, и доказательства гипотетического положительного воздействия аттрактивной «созерцательной архитектуры», сравнимого с результатами медитативных практик. «Созерцательная» архитектура – понятие тождественное «целительной архитектуре» (healing architecture [19]) и подразумевающее решения, аналогичные исстари применявшимся в культовой архитектуре. В ходе эксперимента двенадцати архитекторам демонстрировались фотографии аттративных и рядовых зданий и деталей их интерьера и экстерьера, ученые отслеживали активность мозга испытуемых. Отбор испытуемых одного пола, генотипа, одной профессии, праворуких, не практиковавших медитацию проводился для снижения влияния на результаты экспериментов не связанных с сутью исследования факторов. Профессионалы были логичным выбором в качестве испытуемых, так как тренированный взгляд более восприимчив к деталям архитектуры.

Второй частью исследования стал сбор доказательств «необычного опыта созерцания архитектуры» в Испании и Англии. Большинство зданий и мест из 2982 объектов в фокусе эксперимента спроектированы с целью созерцания: духовного, эстетического, религиозного или символического, на основании чего исследователями был сделан вывод, что «созерцание зданий может вызывать глубинные процессы, преобразующие состояние сознания, при том влияние зданий, созданных непосредственно для этой цели, наибольшее». Помимо храмов, мечетей, иных религиозных зданий, «созерцательными» сооружениями являются художественные галереи, памятники, некоторые дома, например Дом над водопадом Ф.Л. Райта, и такие музеи, как Лувр в Париже, музей Гуггенхайма в Бильбао. Предвосхищая скептические мнения о субъективности изысканий, Бермудес и группа расширили их, включив нейробиологические исследования ментальных состояний, воспроизводимых в лабораторных условиях, и данные об активности лобных долей, соответствующей суждениям о красоте объекта. Ученые ожидали, что «необычные опыты созерцания архитектуры» выявят внеоценочный эстетический опыт и активность в участках мозга, связанных с эмоциями и удовольствием, но не в лобных долях. Наличие внешних стимулов в виде фотоизображений зданий устранило утомительное саморегулирование, возникающее в лобной коре во время традиционной медитации, и улучшило концентрацию внимания у всех испытуемых. Общим результатом опытов стало возникновение сопутствующих эстетических суждений. Сделаны выводы о том, что реакция мозга различна на «созерцательную» и рядовую архитектуру, например здания ортогональных модернистских форм. На конференциях ANFA [20] обсуждались объемно-пространственные направления исследований, как то: определение оптимальной высоты помещений для стимуляции когнитивных функций, влияние типов и интенсивности освещения на настроение и работоспособность, дизайн систем ориентации в городе, вопросы оптимальной планировки больниц для адаптации пациентов с повреждениями мозга.

Изучение психофизиологами восприятия структурно-геометрического построения, габаритов, архитектурного масштаба объектов представляет особый практический проектный интерес для архитектора. Перенасыщенное метрическими рублеными ритмами пространство города вызывает утомление зрительного центра и анализаторов головного мозга. Природные и природоподобные формы возвращают к созерцанию, а в природе практически отсутствуют прямые линии. «…Меня привлекают кривые, свободные и чувственные. Те

кривые, которые мы видим в силуэтах гор, форме морских волн, теле любимой женщины», – писал в своих мемуарах выдающийся архитектор Бразилии О. Нимейер [20]. Упрощение формально-композиционных средств архитектурного формообразования, сведение объекта к сугубо утилитарной цели приводит не только к устранению творческого начала в архитектуре, но и в целом к исчезновению архитектуры как искусства. Озеленение, богатство архитектурных деталей и колорита избавляет архитектуру от утомительных для зрительного анализатора «гомогенных» визуальных полей. Отсутствие пропорциональной согласованности зданий и их частей также негативно влияет на восприятие. Оптимальным для восприятия пропорций рядом остается так называемое золотое сечение – универсальное проявление структурной гармонии, мистическим образом сопутствующее всему живому и наследуемое наукой и искусством – всем, что творит и чем окружает себя человек.

Одним из важных и универсальных факторов хронического стресса является плотность населения, воздействующая на гормональную систему. Действие «фактора плотности популяции» (перенаселения) во всех изученных случаях, у различных птиц и млекопитающих, одинаково: при возрастании плотности и частоты контактов между особями возникает стрессовое состояние, уменьшающее рождаемость и повышающее смертность. Горожане чаще страдают нарушениями психики: тревожным неврозом, аффективным расстройством. Научно доказано влияние плотности населения на функции миндалевидного тела и гиппокампа: в крупных населенных пунктах миндалевидное тело сильнее активизируется в ответ на стресс, нейрогенез угнетается. По данным полиции Нью-Йорка, преступность в городе увеличивается почти пропорционально высоте застройки: при трехэтажной совершается 8,8 преступления на тысячу жителей, при шестнадцатиэтажной и более – до 20,2.

Ученые лаборатории психофизиологии ННГУ им. Н.И. Лобачевского занимаются изучением сознания и высших мыслительных процессов с помощью информационных моделей [21]. Выводы когнитивистики основаны на измерении откликов, возникающих в организме при определенных актах сознания и связанных с работой внутренних органов. Современная когнитивная наука доказала, что существует множество контекстно-зависимых режимов работы организма, архитектурно-пространственная среда города также является контекстом психофизиологии. Неблагоприятный контекст дорожной инфраструктуры Нижнего Новгорода исследовали при помощи аппаратной динамической фиксации сердечного ритма не стандартными для РФ холтеровскими мониторами, а малогабаритными устройствами производства США, не стесняющими функциональной активности испытуемого. Согласовано три потока данных: сердечного ритма, навигатора и видеорегистратора. Нижегородские ученые составили «карту стрессогенных зон города» [22], используя кардиомониторирование автомобилистов. Нижегородские ученые первыми в мире с точностью до секунд зафиксировали момент «включения» стресса и запатентовали способ, с помощью которого это удалось. В базе данных они связали каждый фрагмент записи видеорегистратора с точными временем и местом стресса, где приборы зафиксировали изменение сердечного ритма водителя. Наглядные доказательства проблем автодорожной сети города собраны в единую «Интерактивную карту стрессогенных зон Нижнего Новгорода». Карта – результат проекта «Картирование стрессогенности городской среды относительно водителей транспорта», реализованного в 2014 г. под руководством заведующей отделом нейрофизиологии ЦНИЛ НижГМА, кафедры психофизиологии ФСН ННГУ доктора биологических наук С. Полевой и заведующего лабораторией когнитивной психофизиологии ФСН ННГУ профессора С. Парина [23].

«Картирование стрессогенности городской среды относительно водителей транспорта» создало уникальный информационный ресурс для анализа стрессогенных зон дорожной инфраструктуры города. Ведь опасен не только сам по себе стресс, при котором снижается эффективность деятельности водителей: скорость движения растет, способность маневрирования, реакции падает, увеличивается число оттенков, субъективно относимых к синему спектру, желтый сигнал путается с зеленым, в результате изменения восприятия искажается ориентация в пространстве, дорожные знаки неверно читаются. Объем исследования включил информацию о более чем десятке водителей общественного и частного транспорта. Данные исследования на карте Нижнего Новгорода статистически отображены в виде цветных зон. Красным отмечены зоны повышенной частоты ДТП, синим – зоны общей стрессогенности. Размер круга отвечает количеству испытывавших стресс на данном участке респондентов. Архитекторы-градостроители, используя стресс-карту, могли бы проанализировать и затем скорректировать план развития городской дорожной инфраструктуры и транспортных узлов. Однако для детальной аналитической работы необходим анализ совмещенных данных и «слоев» карты комбинированной группой ученых специалистов – градостроителей, архитекторов и психофизиологов. В существующем виде карта для градостроителей и планировщиков недостаточно информативна.

На основе изучения мирового опыта учеными-урбанистами можно выделить некоторые форм-факторы «фреймов» и типы «якорных» точек [13] пространств проезжей части, которые следует особенно пристально изучить на видеозаписях при учащении пульса испытуемых:

1) категорию мерности пространства по разным классификациям и масштаб относительно человека (мезо, микро, макро) [12–15, 17], напрямую связанные со скоростью реакции и перехода сигнала от зрительных нейронов к комплексным (с опорой на Д. Хьюбела);

2) конфигурацию пространства относительно транспортного средства;

3) разметку (метрика и ее соотношение с маневренностью транспортных средств, сложность геометрической конфигурации разметки);

4) расположение дорожных знаков и светофоров;

5) технические характеристики автомобиля, час дня, плотность потока;

6) освещенность, цветность и плотность (высота, визуальная масса ограждающих пространство объемов, обзор) окружающего пространства, архитектурный свет и уличное освещение;

7) векторную направленность движения – маршруты движения транспорта и сопряженных трасс пешеходов и сценарность восприятия во времени («фрейм»), фактически, являются его четвертым измерением;

8) структуру визуальных преград внутри пространства и его геометрические характеристики [11, 18].

Литература

1. *Радзюкевич А.В.* Критический анализ исследований Адольфа Цейзинга, основоположника гипотезы «золотого сечения» // AMIT. 2014. № 4 (29). URL: https://marhi.ru/AMIT/2014/4kvart14/radzukevich/radzukevich.pdf.

2. *Арнхейм Р.* Искусство и визуальное восприятие. М. : Прогресс, 1974.

3. *Шаповал А.* Теория формальной композиции : учебник для вузов. Казань : Дизайн квартал, 2016.

4. *Arbib M.* How the brain got language: the mirror neuron hypothesis. Oxford : Oxford University Press, 2012. URL: https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199896684.001.0001.

5. *Хьюбел Д.* Глаз, мозг, зрение. М. : Мир, 1990.

6. *Arnheim R.* Entropy and art : an essay on disorder and order. Berkeley ; Los Angeles ; London : University of California Press, 1971.

7. *Rupert S.* Physiomimetics : a process architecture and construction paradigm [Электронный ресурс]. 18.02.2013. Adaptive Ecologies Evening Lecture Series. URL: http://www.aaschool.ac.uk/VIDEO/lecture.php?ID=2073.

8. *Jencks Ch.A.* The new paradigm in architecture. Yale : Yale University Press, 2002.

9. *Chebereva O.* Problems of the system approach to the study of psychophysiology of aesthetic emotions concerning an architecture // COGNITIVE 2018 **(**The Tenth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications, February 18-22, 2018. Barcelona, Spain). IARIA XPS Press, 2018. P. 24–29.

10. *Chebereva O.* The phisiomimetics as the main principle of architectural forming and aesthetic emotions // Int. J. Advances in Life Sciences. 2018. V. 10, № 3/4. P. 183–197. URL: http://www.iariajournals.org/life_sciences/.

11. *Эллард К.* Среда обитания : как архитектура влияет на наше поведение и самочувствие. М. : Альпина Паблишер, 2017.

12. *Крашенинников А.* Макропространства городской среды // AMIT. 2016. № 3 (36). URL: https://marhi.ru/AMIT/2016/3kvart16/krasheninnikov/AMIT_36_krasheninnikov.pdf.

13. *Крашенинников А.* Сценарное проектирование пешеходного пространства // AMIT. 2017. № 4 (41). URL: https://marhi.ru/AMIT/2016/3kvart16/ krasheninnikov/AMIT_36_krasheninnikov.pdf.

14. *Крашенинников А.* Микропространства городской среды // AMIT. 2014. № 4 (29). URL: https://marhi.ru/AMIT/2014/4kvart14/krasheninnikov/krasheninnikov.pdf.

15. *Крашенинников А.* Мезопространства городской среды // AMIT. 2015. № 4 (33). URL: https://marhi.ru/AMIT/2015/4kvart15/krash/krash.pdf.

16. *Сирина Д.* Подходы к исследованию структуры городских агломераций // Науковедение : интернет-журнал. 2017. Т. 9, № 1. URL: https://naukovedenie.ru/PDF/12TVN117.pdf.

17. *Шимко В., Гаврилина А.* Типологические основы художественного проектирования архитектурной среды : учеб. пособие. М. : Архитектура-С, 2004.

18. *Fisher Th.* How neuroscience can influence architecture // J. American Institute of Architects. 06.10.2016. URL: https://www.architectmagazine.com/practice/how-neuroscience-can-influence-architecture_oResearch.

19. *Lawson B.* Healing architecture // Arts & Health. 2010. V. 2, № 2. P. 95–108.

20. *Manpreet J.* Designing mindspaces // Re-inventing urbanspaces by understanding. Psychology of design and philosophy of heterotopia. The hidden ways that architecture affects how you feel. San Francisco ; Toronto : MDes, December 2016.

21. *Parin S., Polevaya S., Polavaya A.* “ A neirochemical framework to stress and the role of the endogenous opioid system in the control of healf rate variability for cognitive load” of // COGNITIVE 2017 (The Ninth International Conference on Advanced Cognitive Tecnologies and Applications). IARIA, 2017. P. 16–20.

22. Опасности города – в сердечном ритме автомобилистов : ученые четко показали старую проблему // NN.RU : Нижний Новгород онлайн. 28.03.2015. URL: https://m.nn.ru/news/gorod/2015/03/28/opasnosti_goroda__v_serdechnom_ritme_avtomobilistov/.

Символьное мышление роботов

С.А. Шумский

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)
email: serge.shumsky@gmail.com

Введение

В ходе недавно начавшейся *революции глубокого обучения* уровень машинного интеллекта радикально повысился. Появился *сенсорный интеллект*, позволяющий машинам строить абстрактные модели внешнего мира, выделять в них объекты и кодировать их отношения. У машин появились зачатки *воображения* – способности генерировать образы внешнего мира по их внутреннему представлению. Машины сегодня могут обучаться разумному поведению, нацеленному на достижение долгосрочных целей. Причем в некоторых областях, например в играх, они демонстрируют уже сверхчеловеческие способности.

Следующим логическим шагом развития машинного интеллекта видится объединение частных типов мышления в единую систему – *искусственную психику*. Это означает переход от уровня подсистем к системному уровню, от решения поставленных кем-то задач – к самостоятельной постановке целей.

Будущие роботы будут не просто учиться, *как* решать ту или иную поставленную задачу, но и понимать, *какую именно* задачу они должны решать в каждый данный момент и почему именно ее. Иными словами, роботы должны будут обучаться здравому смыслу и человеческим *ценностям*. Поэтому будущая искусственная психика роботов – это не что иное, как тот самый *сильный ИИ* (Artificial General Intelligence). И ожидать его появления следует уже довольно скоро, с учетом того, что новый рынок массовых роботов будет измеряться триллионами долларов. Так что гонка за сильным ИИ уже началась.

Однако, как мы знаем, пока что сильного ИИ еще не существует. Возникает естественный вопрос: почему? В этой работе мы рассмотрим, в чем состоит основная проблема, предложим вариант ее решения и обсудим конкретные шаги на пути к сильному ИИ.

1. Постановка задачи: как обучать роботов?

Все понимают, что роботов будет очень много и очень разных, и гораздо удобнее будет иметь для них одну общую операционную систему, своего рода искусственную психику роботов, основанную не на программировании, а на дрессировке или более политкорректно – на воспитании, а по-научному – на обучении с подкреплением.

Это самый сложный вид обучения, где решаемые задачи не формулируются в явном виде. То есть роботы должны будут сами угадывать, что от них требуется в том или ином контексте, и предлагать соответствующие решения, ориентируясь на оценку своего поведения людьми или окружением.

Основная не решенная на сегодня проблема – распространить принципы глубокого обучения на обучение с подкреплением. Несмотря на обилие статей по теме deep reinforcement learning, эта проблема до сих пор не имеет удовлетворительного решения.

Действительно, посмотрим на сегодняшнего фаворита – AlphaZero от компании Google DeepMind, удачно сочетающего интуицию глубоких нейросетей с просчетом различных вариантов поведения.

Интуиция у сети AlphaZero на самом деле глубокая – для любой позиции она предлагает ее оценку и несколько вариантов лучших ходов. Однако эта интуиция простирается только на один ход вперед. Глубоко эшелонированное планирование у AlphaZero отсутствует. У нее нет плана игры, нет замыслов, которые она воплощает. Раз за разом она пошагово просматривает дерево вариантов методом грубой силы. Чтобы просмотреть всю партию и получить наконец оценку всей этой длинной цепочки ходов, приходится строить сотни таких деревьев (рис. 1).

Рис. 1

Как результат такого примитивного, в общем-то, мышления, обучение AlphaZero потребовало бы более года работы петафлопного суперкомпьютера (примерно столько это и заняло на самом деле). Не всякая компания может себе такое позволить, не говоря уже о роботе.

В DeepMind это прекрасно понимают и не удивительно, что исследовательская программа DeepMind сосредоточена как раз на высокоуровневом символьном мышлении. Почему именно на символьном? И как может выглядеть такое мышление?

2. Решение: глубокое символьное обучение

В нашем варианте ответа такое мышление основано на иерархии планов, когда сначала вырабатывается крупномасштабный замысел, который прорабатывается и воплощается в жизнь постепенно, по мере развития событий. Планирование и обучение происходят в реальном времени, а сложность обучения радикально снижается.

Давайте сначала разберемся с символами, которые отличаются от широкополосных образов тем, что их обычно немного. Например, 30 букв, которые можно закодировать 5 битами. В отличие от мегабитных образов, с которыми гораздо тяжелее работать (скажем, глазной нерв содержит как раз миллион нервных волокон). Поэтому, прежде чем планировать свое поведение, человек (и не только он) находит компактные символьные представления для образов внешнего мира. (Символы представляют собой сжатые коды смыслового содержания образной информации.) Мышление оперирует уже символьными данными для постановки целей и планирования действий. Эти планы затем распаковываются обратно эффекторами в действия, совершаемые в реальном мире (рис. 2).

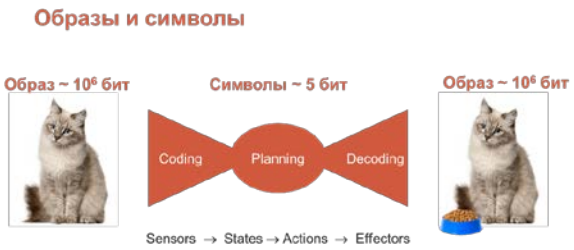


Рис. 2

Предлагаемое нами решение базируется на очень простом способе символьного кодирования образов, известном как разреженное бинарное кодирование. Такое кодирование использует несколько различных вариантов кластеризаций широкополосных данных с использованием разных признаковых пространств.

Представим себе набор формальных нейронов, работающих по принципу «победитель забирает все», например карты Кохонена. Именно так устроены гиперколонки в нашем неокортексе, содержащие около 30 колонок, взаимно подавляющих друг друга, так что возбужденной может быть лишь одна из них. Если таких гиперколонок несколько, то они осуществляют разреженное кодирование образов. Что, скорее всего, и происходит в нашем мозгу (рис. 3).

Рис. 3

Причем общее количество кодирующих элементов растет арифметически, тогда как количество вариантов кодируемых образов – геометрически! Например, 7 гиперколонок по 30 колонок в каждой достаточно для кодирования 10^{10} образов. А больше нам и не надо, так как больше мы не сможем увидеть за всю свою жизнь. При этом каждый элемент кода мы можем закодировать всего лишь одним байтом, а картинка будет кодироваться не миллионами, а всего лишь 7 байтами.

Теперь переходим к главному: как символьное мышление связано с планированием. Оказывается, самым непосредственным образом. Символы позволяют кодировать и запоминать цепочки действий. Скажем, последовательность из трех символов может иметь лишь 30 тыс. вариантов, которые легко запомнить. Мы ведь помним гораздо больше слов – словари содержат их сотни тысяч.

На самом деле слова нашего языка устроены не абы как, а особым образом – рекурсивно, т. е. их можно представить в виде деревьев. Поэтому мы можем запоминать не только трех- или четырехбуквенные, но и гораздо более длинные слова. Вот и наше решение также основано на так называемом *рекурсивном модуле*, состоящем из нескольких гиперколонок с локальными связями, смотрящих и на кодирующую гиперколонку и на самих себя. Можно показать, что такой модуль осуществляет пространственное кодирование временных паттернов, т. е. последовательностей символов. Он кодирует временную развертку сигнала (рис. 4).

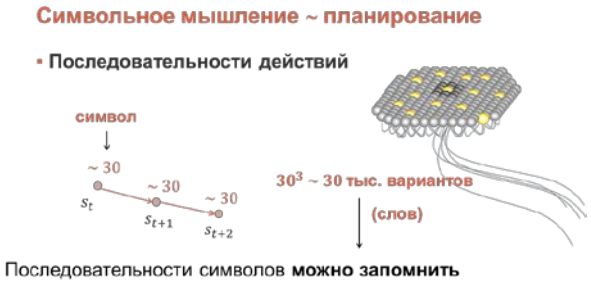


Рис. 4

Соответственно, набор таких модулей осуществляет пространственное кодирование последовательностей образов, т. е. позволяет предсказывать и планировать поведение в реальном мире (рис. 5).

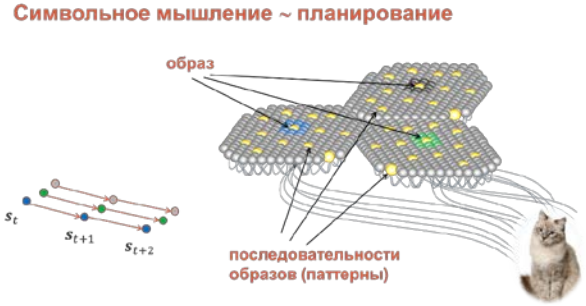


Рис. 5

Правда эти последовательности все равно достаточно короткие (как и слова языка). Как же нам

кодировать поведение на бо́льших временных масштабах? В языке, например, мы можем складывать слова в предложения, основываясь на их смыслах.

Именно в этом и состоит идея глубокого, т. е. иерархического, символьного обучения. Каждый следующий уровень рекурсивных модулей смотрит на модули предыдущего уровня и кодирует соответствующие последовательности более абстрактными «смысловыми» символами, представляющими каждый какой-то тип последовательностей. Из этих символов можно строить новые последовательности, но уже на новом временном масштабе. И так далее (рис. 6).

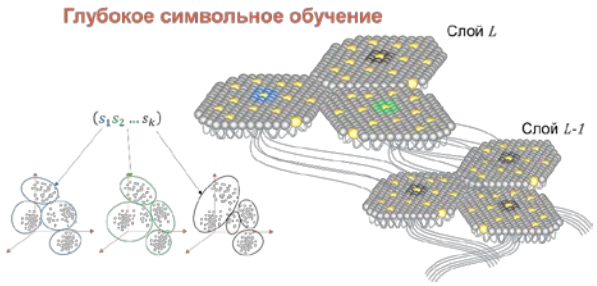


Рис. 6

Таким образом, наше решение позволяет запоминать и использовать наиболее полезные паттерны поведения на разных временных масштабах. Полезность определяется подкрепляющими сигналами, отбраковывающими «плохие» цепочки действий и отбирающими «хорошие».

Обучение производится снизу вверх – от простого к сложному. А поведение, наоборот, планируется сверху вниз – от целей к средствам их достижения (рис. 7).

Рис. 7

Заключение

Резюмируя, предложенный в данной работе алгоритм глубокого обучения с подкреплением осуществляет одновременное согласованное планирование поведения на многих масштабах времени. Каждый шаг уровня L+1 соответствует последовательности шагов уровня L. Причем планы более низких уровней вписываются в планы более высоких. Коррекция планов происходит там и тогда, когда их предсказания перестают соответствовать реальности. В целом, по мере накопления опыта и роста числа слоев, система обучается адаптивному целенаправленному поведению на все более долгих временных масштабах. Такой подход можно положить в основу будущей операционной системы роботов.

Авторский указатель

А

Аверкина Л.А. 9
Айдаркин Е.К. 12
Александров И.О. 18, 116
Александров Ю.И. 16, 161, 173, 176, 187
Александрова Н.Ш. 22, 27
Алексеев А.К. 31
Антонец В.А. 27, 34
Апанович В.В. 16, 187
Архипов А.Ю. 193
Астахова Д.И. 38
Атанов М.С. 166

Б

Балаев В.В. 166
Бахчина А.В. 173
Бахшиев А.В. 41, 202
Башкатова Ю.В. 199
Безручко Б.П. 51, 84
Беллюстин Н.С. 211
Белобров П.И. 45
Бойко И.М. 113
Бойцова Ю.А. 92
Бондарь А.Т. 49
Боровкова Е.И. 51, 84
Бронфельд Г.Б. 54

В

Вартанов А.В. 193
Величковский Б.М. 58, 193
Волохонский В.Л. 121

Г

Гапанюк Ю.Е. 78
Григорьева С.В. 66
Гринченко Ю.В. 173

Д

Данько С.Г. 92
Дерюгин А.А. 191
Дорохов В.Б. 193
Дорошева Е.А. 59, 63

Е

Енягина И.М. 193
Еськов В.В. 199
Еськов В.М. 66
Ефимов К.В. 166

Ж

Жеребцов С.В. 76
Жиганов Л.С. 173
Журавлев М.О. 69, 71

З

Заварнова Ю.А. 18, 116
Зайцева И.О. 73
Запара Т.А. 154, 158
Захарова Н.В. 193
Захарчук А.Г. 76
Зинченко Ю.П. 66

И

Иваницкий Г.А. 166
Ивашкина В.А. 76

К

Каганов Ю.Т. 78
Казанович Я.Б. 80
Калинина В.И. 207, 211
Караваев А.С. 51, 84
Карташов С.И. 193
Кашеварова О.Д. 166
Киров Д.И. 54
Клочков Б.Н. 88
Князева И.С. 92
Корсакова-Крейн М. 96
Костюк Г.П. 193
Котович Ю.В. 166
Крылов А.К. 100
Крынский С.А. 193
Крючков Ю.А. 71
Кузенков О.А. 103, 107
Кузенкова Г.В. 103, 107
Кузнецов А.А. 109

Л

Ластовецкий А.Г. 122
Лосик Г.В. 113, 191
Луйтелаар Ж. 120

М

Макаренко Н.Г. 92
Максимова Н.Е. 18, 116
Малахов Д.Г. 193
Малашенкова И.К. 193
Малиновская П.И. 166
Мамедова Г.Ш. 193
Мартынова О.В. 166
Масленникова А.В. 193
Медведева Т.М. 120
Меклер А.А. 121
Минина Е.Н. 122
Молошников И.А. 193
Мухина И.В. 127

Н

Никонов Ю.В. 124
Нужина Н.С. 127
Нуйдель И.В. 27, 130

О

Огурцов Д.П. 193
Ольшанский В.М. 135
Орлов А.В. 137
Орлов В.А. 193
Орлова С.Р. 202

П

Павловская М.А. 140
Панкрашкина Н.Г. 170
Парин С.Б. 143, 149
Парина И.С. 143
Петров С.В. 113
Пляшкевич В.Л. 145
Полевая А.В. 185
Полевая С.А. 49, 149, 152
Продиус П.А. 127
Проскура А.Л. 154, 158

Р

Ратушняк А.С. 154, 158
Руннова А.Е. 69, 71

С

Савицкая Т.Ю. 161
Савчук Л.В. 149
Сбоев А.Г. 193
Свиридов В.С. 18, 116
Селиванов А.А. 193
Селиверстова К.К. 149
Ситникова Е.Ю. 163
Скакун А.И. 166
Сляднев С.Е. 170
Созинов А.А. 173, 187
Созинова И.М. 176

Соколов М.Е. 130
Сорокоумов Е.Д. 158
Спивак И.М. 76
Станкевич Л.А. 41
Станкова Е.П. 121
Стрелец В.Б. 193
Сысоев И.В. 38, 120, 180, 182
Сысоева М.В. 38, 120, 182
Сычева Е.Е. 185

Т

Тельных А.А. 215
Тельных Н.А. 152
Тетерева А.О. 166
Тищенко А.Г. 187
Ткачёва Л.О. 121
Ткаченко В.В. 191
Турубар Д.С. 18, 116

У

Ушаков В.Л. 193

Ф

Федотчев А.И. 49, 149
Филатов М.А. 66
Филатова Д.Ю. 199
Филатова О.Е. 199
Фомин И.С. 202

Х

Хайлов Н.А. 193
Хилько А.А. 207
Хилько А.И. 207, 211, 215
Хоботов А.Г. 207, 211, 215
Хрисанфова Л.А. 219
Хроматов В.Е. 170

Ц

Циркова М.М. 152
Цукерман В.Д. 222
Цхадаиа Л.Г. 187

Ч

Чеберева О.Н. 226

Ш

Шараев М.Г. 193
Шемагина О.В. 27, 130
Шивоева Д.А. 219
Шумский С.А. 230

Щ

Щуковский Н.В. 71

Я

Яхно В.Г. 27

A

Arsalidou M. 193

L

Lüttjohann A.K. 120, 180

V

Van Rijn C.M. 182

Научное издание

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2019

ТРУДЫ VI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Редакторы *И.А. Кокорина, Н.Н. Кралина*
Верстка *М.В. Башевой, Н.Н. Кралиной*
Корректор *Д.П. Семенова*
Обложка *С.В. Кротовой*

Усл. печ. л. 30,5. Уч.-изд. л. 28,3.
Тираж 120 экз. Заказ № 64(2019).

Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Отпечатано на ризографе в типографии Института прикладной физики РАН

УДК 821.112.2"19/20"

Магический реализм – явление в искусстве и литературе XX–XXI веков

Аверкина Л.А.

Магический реализм – это художественный метод, в котором магические элементы включены в реалистическую картину мира. Впервые термин «магический реализм» употребил немецкий критик Франц Рох в книге «Постэкспрессионизм» (1925) для описания нового жанра живописи, применительно к литературе этот термин был предложен французским критиком Эдмоном Жалу в 1931 г. Сегодня все чаще говорят о развитии магического реализма как тенденции мирового литературного процесса, ярким представителем которого является немецкоязычный писатель Д. Кельман. Магический реализм из-за использования фольклорных и мифологических образов, обращения к историческому прошлому воспринимается как средство выражения национальной самоидентификации, ставшей важнейшим общеевропейским вопросом в контексте глобализации. Этот художественный метод позволяет охарактеризовать пережившее трансформацию европейское общество, которое из национально-гомогенного становится мультикультурным.

УДК 612.8

Взаимодействие перцептивных, центральных и моторных компонентов бимодальной реакции выбора

Айдаркин Е.К.

В статье обсуждаются основные механизмы, обеспечивающие реализацию реакции выбора: перцептивная стадия (предобработка, извлечение основных параметров стимула и его идентификация) и связанные с двигательным ответом стадии (принятие моторного решения, моторное программирование и коррекция моторной реакции), которые взаимодействуют между собой, и их активность перекрывается во времени.

УДК 159.9.07

Эйлерова характеристика непланарностей в топологии психологических структур

Александров И.О., Максимова Н.Е., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С.

Анализируется топология психологических структур (ПС), рассматривающихся как семантическая неоднородная сеть, вершины которой представляют компоненты ПС, а дуги – отношения между компонентами. В сетевой организации выделяются подмножества, образованные отношениями различного типа. Установлено, что топология пространства ПС фрагментирована: разные его области имеют различные эйлеровы характеристики. Выявлена достоверная связь между параметрами непланарных групп с эйлеровой характеристикой $\chi = -2$ и оценкой межиндивидуальных отношений, сформулирована гипотеза, что в этом соотношении проявляется ключевая для расстройств шизофренического спектра симптоматика – дефицит в социальных отношениях, а непланарности этого типа являются важными составляющими кроссиндивидуальных психологических структур.

УДК 159.9.07

Значение меж- и внутрикультурных ментальных вариаций

Александров Ю.И., Апанович В.В.

Аналитическое мышление, присущее преимущественно западным культурам (США, Западная Европа), предполагает смещение внимания на объект как таковой, изучение его внутренней структуры и законов, холистическое мышление, характерное для незападных культур (Южная Корея, Япония, Китай), предполагает больший учет социального контекста, акцент на взаимосвязях между объектами и явлениями. Выявлено, что при решении задач вариативность мозгового обеспечения поведения по-разному соотносится с ментальностью субъектов: при аналитической задаче количество альтернатив сравнительно невелико; при холистической – слишком велико или их полный перебор в принципе невозможен. Показано, что аналитичные субъекты успешнее решают аналитические задачи, а холистичные – холистические, кроме того, все типы задач (аналитические и холистические) быстрее решаются комплементарными парами (т. е. состоящими из аналитичного и холистичного субъекта), нежели гомогенными парами. Это соотносится с представлениями о том, что изоляция популяции от взаимодействия с другими культурами приводит к нежизнеспособности культуры, и напротив, о большей адаптивности популяций, характеризующихся более активными миграционными процессами.

УДК 57.024+616.001+616.831-079.2

Зрительные агнозии и двойственность зрительного опознания

Александрова Н.Ш.

Работа содержит предположение об организации зрительного восприятия и опознания человеком отдельных объектов (зрительный гнозис). Основное внимание уделено анализу лицевой и буквенной агнозий. Зрительный гнозис, в норме отвечающий за опознание отдельных объектов, обеспечивается взаимодействием двух когнитивных механизмов: индивидуализированного восприятия (опознания) зрительных стимулов и аналитико-синтетической деятельности, вычленяющей в индивидуализированном восприятии функциональные (топологические) схемы предметов. Два когнитивных механизма находятся в постоянном взаимодействии и проявляются в зависимости от качества зрительного стимула и задачи опознания. При зрительных агнозиях в результате одностороннего поражения мозга нарушается вклад одного из механизмов зрительного опознания, поэтому пациент вынужден опираться на сохранный механизм, что и обуславливает известную симптоматику зрительных агнозий и возможности компенсации.

УДК 51-77

Моделирование режимов спонтанного освоения нескольких языков как инструментов общения

Александрова Н.Ш., Антонец В.А., Нуйдель И.В., Шемагина О.В., Яхно В.Г.

Приведенная феноменологическая модель спонтанного освоения языков как инструментов общения позволила выделить области параметров, соответствующих экспериментально зафиксированным режимам при освоении языков у детей. Показано, что при больших порогах включения механизмов освоения (обучения) и осознанного восприятия потока внешних сенсорных сигналов возможно блокирование спонтанного освоения. Эти пороги возрастают при неблагоприятных эмоциональных состояниях или при недостаточном энергетическом обеспечении субъекта. Показано, что спонтанное, естественное освоение нескольких (двух) языков приводит к снижению объема каждого языка по сравнению со случаем освоения только одного языка. Причина этого заключается в трате временного ресурса на несколько языков вместо использования его на освоение одного языка. Рассмотрены условия, при которых происходят переключения от освоения двух языков к освоению только одного языка и торможению другого или торможению освоения обоих языков.

УДК 519.72

Перенос ценной информации и причинность

Алексеев А.К.

Перенос ценной информации векторного и тензорного типов позволяет определить «причинность по Марчуку» и «причинность по Колмогорову». Эти понятия имеют широкую область применения при решении прямых и обратных задач, описываемых уравнениями в частных производных, однако в явном виде не формулируются. Рассмотрены возможности анализа причинности, порождаемой ценной информацией, с точки зрения корректности постановок прямых задач и оккамовской регуляризации обратных.

УДК 159.9.01

Постулаты теории мышления и их следствия. Часть первая

Антонец В.А.

В работе делается попытка идентификации объективно подтвержденных фактов и использования их как постулатов для логического построения теории мышления (человека) и предполагается, что оно подчиняется неким фундаментальным законам. Теория мышления должна обладать теми свойствами, которыми обладают естественно-научные теории: на основе логики выводить из постулатов объяснения известных фактов и предсказания еще не известных, проверка которых могла бы опровергнуть предлагаемую теорию. Также сделана попытка модифицировать методологический подход к изучению процесса мышления так, чтобы он вмещал в себя основанные на фактах постулаты, логические следствия принятых постулатов, а также гипотезы, допускающие экспериментальную проверку.

УДК 51-76

Выявление направления связи в ансамблях нейроосцилляторов по их временным рядам методом частной направленной когерентности

Астахова Д.И., Сысоева М.В., Сысоев И.В.

Одним из перспективных методов анализа направленной оценки связи биологических данных является метод частной направленной когерентности. Представлен новый частотно-разрешенный подход к описанию взаимосвязей (направления информационного потока) между многомерными временными рядами, основанный на декомпозиции многомерных частных когерентностей, вычисленных по многомерным авторегрессионным моделям.

УДК 004.942+004.896+004.383.8

Моделирование процессов оптимизации ресурсов нейрона как элемента самоорганизующихся динамических нейронных структур

Бахшиев А.В., Станкевич Л.А.

Рассматривается модель спайкового нейрона как части самоорганизующейся нейронной сети. В основу принципов самоорганизации положено моделирование процессов жизнеобеспечения нейрона, функционирующего в условиях конкуренции за ограниченные ресурсы. Проведены эксперименты, демонстрирующие возникновение в небольших нейронных структурах ансамблей, оптимизирующих суммарный расход энергии ансамблем как ответ на характерные паттерны входных сигналов.

УДК 517.518.114+573.2

Биологическая метрология познавательных функций

Белобров П.И.

Проведен анализ понятия нечисловых мер. Сформулирован вариант совместных условных мер и показана возможность измерения ими биологических процессов, в частности когнитивных функций. Биологические переменные и нечисловые меры полезны при создании стандартов и шаблонов для сравнения, они дополняют линейку устройств биологической метрологии. Рассмотрены основные аспекты появления новых свойств. Предложена новая идея перехода от количественных физических мер к лингвистическим и философским мерам путем введения нечисловых мер.

УДК 612.821:612.822.3

Пространственные особенности нелинейных процессов в коре головного мозга человека

Бондарь А.Т., Федотчев А.И., Полевая С.А.

Исследуются пространственные свойства нелинейности в коре головного мозга при фотостимуляции синусоидальными сигналами 6 и 9 Гц. Показано, что ЭЭГ-реакции на стимуляцию синусоидальными сигналами имеют крайне нелинейный характер, проявляющийся в присутствии в спектрах ответов множества гармоник. Проявление гармоник в различных отведениях не одинаково, т. е. нелинейность имеет пространственные особенности. Для их исследования осуществлялось картирование коэффициентов нелинейных искажений по коре. Картирование показало наличие хорошо очерченных локусов минимальных и максимальных значений этих коэффициентов.

УДК 57.087+612.281

Диагностика направленных связей между медленными колебаниями потенциалов головного мозга и процессом дыхания

Боровкова Е.И., Караваев А.С., Безручко Б.П.

Предложена методика диагностики направленных связей между медленными колебаниями потенциалов головного мозга и процессом дыхания у бодрствующих здоровых людей при спонтанном дыхании. Методика апробирована в ходе анализа записей трех здоровых испытуемых.

УДК 004.822

Принципиальный подход к практически вечному сохранению знаний на основе технологии прямого наложения знаний

Бронфельд Г.Б., Киров Д.И.

Рассматривается проблема обеспечения долговременного хранения знаний и информации. В настоящее время это является частью сохранения цифрового наследия человечества. Описывается новый способ моделирования знаний, новая технология прямого наложения знаний (ТПНЗ), новый вид интеллектуальных систем – элинг, использующих ТПНЗ. Проводится сравнительный анализ машинных носителей информации для долговременного хранения знаний и информации. Показывается, что ТПНЗ и элинги могут обеспечить практически вечное сохранение как минимум знаний, необходимых людям для практической деятельности и выживания в природной среде.

УДК 612.821.88

Grand Design когнитивной организации: междисциплинарная одиссея

Величковский Б.М.

В Курчатовском НБИКС-центре в 2016–2019 гг. проводится цикл междисциплинарных исследований уровневой организации мозга и сознания человека. В этих исследованиях на базе применения методов математической физики, нейрофизиологии, генетики, психосемантики и клинической нейропсихологии удалось открыть массивную асимметрию взаимодействий эволюционно различных структур коры головного мозга человека в базовом для сознания состоянии бодрствующего покоя. Благодаря анализу дифференциальной экспрессии белок-кодирующих генов в структурах фронтополярной коры человека в параллельной линии экспериментов были впервые описаны молекулярные аналоги обнаруженной латерализации связей макросетей головного мозга. Предложена гипотеза центральной роли правого гиппокампа (как современного варианта органа sensus communis) в возникновении подобной асимметрии.

УДК 159.94

Особенности аффективно-когнитивных регуляторных процессов у матерей, воспитывающих детей с расстройством аутистического спектра

Дорошева Е.А.

Целью исследования было изучение аффективно-когнитивных способов регуляции эмоций у матерей, воспитывающих детей с расстройствами аутистического спектра (РАС). Дополнительно изучалась взаимосвязь используемых способов регуляции эмоций с самооценкой особенностей эмоциональных взаимодействий с ребенком. Показано, что стратегии регуляции эмоций в целом в большей степени применяются матерями, воспитывающими детей с РАС, чем матерями нейротипичных детей. В частности, это касается когнитивной переоценки ситуаций, связанных с ребенком, и подавления мыслей о нежелательных ситуациях, также связанных с ребенком, и смирения с негативными ситуациями в целом. Чувствительность к состоянию ребенка связана с рядом условно неадаптивных стратегий регуляции эмоций, эти связи более проявлены в группе матерей, воспитывающих детей с РАС. По всей видимости, чувствительность матери к состояниям ребенка как фактор его благополучия должна рассматриваться в неотрывной связи со способностью регулировать собственное и его состояние.

УДК 159.94

Стратегии эмоциональной регуляции в структуре эмоционального интеллекта

Дорошева Е.А.

Целью исследования было выявление места стратегий регуляции эмоций по Дж. Гроссу в структуре эмоционального интеллекта. Показано, что субъективное представление об умении управлять своими эмоциями тесно связано с предпочтением условно эффективных стратегий регуляции эмоций, главная характеристика которых – сохранение контакта с проблемной ситуацией. Представление о неумении управлять собственными эмоциями связано с предпочтением условно неэффективных стратегий регуляции эмоций, предполагающих ту или иную форму ухода от проблемной ситуации в целом. Уровень волевых процессов прямо связан с рядом условно эффективных стратегий регуляции эмоций, обратно – с условно неэффективными. Сохранение возможности контакта с ситуацией, вызывающей отрицательные эмоции, возможно, связано с более высоким уровнем волевой саморегуляции. Похоже, что для понимания собственных эмоций важно почти в той же мере находиться в контакте с проблемными ситуациями. Это может позволить «включать» стратегии регуляции эмоций уже после вхождения в контакт с реальным эмоциогенным стимулом, что дает возможность почувствовать свои первичные эмоции, возникающие в ответ на стимул.

УДК 612.821.88+530.145.3

Возможности квантовой механики в когнитивных науках

Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатов М.А., Григорьева С.В.

В работе выполнен анализ поведения биопотенциалов мозга с позиций нейрофизиологии (в частности, на основе анализа данных электроэнцефалографии) и с позиций квантовой механики. При этом используется принцип неопределенности Гейзенберга из квантовой механики и новые представления о хаосе нейросетей мозга.

УДК 612.821+530.182

Методы анализа электрической активности головного мозга человека и расчета объективных численных критериев колебательной активности на ЭЭГ-сигналах

Журавлев М.О., Руннова А.Е.

Разработана модифицированная методика для частотно-временного анализа многоканальных записей электрической активности головного мозга во время решения различного рода когнитивных задач. Предложенный метод основан на использовании непрерывного вейвлетного преобразования. Метод не только позволяет детектировать возникающие частотно-временные паттерны электрической активности головного мозга в каждый момент времени, но и дает возможность следить за их эволюцией во времени.

УДК 612.821+530.182

Методы поиска и оценки выраженности паттернов воображаемой и реальной двигательной активности пациента в постинсультном периоде на основе радиофизической интерпретации ЭЭГ-сигналов

Журавлев М.О., Руннова А.Е., Крючков Ю.А., Щуковский Н.В.

В работе представлена оценка особенности изменения биоэлектрической активности головного мозга в ответ на реальные и воображаемые движения у пациентов с моторными нарушениями после перенесенного инсульта для последующего применения реабилитации методом неинвазивного интерфейса «мозг – компьютер».

УДК 159.9:612.821

Применение телеметрии функционального состояния человека для оценки эффективности и безопасности виртуального тренинга

Зайцева И.О.

Разработана технология, позволяющая оценить качество влияния на функциональное состояние человека виртуальных тренингов различных видов, отследить безопасность и эффективность воздействия. Выяснилось, что событийно-связанная телеметрия ритма сердца и вербально-семантическая проективная оценка эмоциональной дезадаптации – эффективные инструменты мониторинга функционального состояния в контексте интернет-ориентированных тренингов. Распределение активности в системе «эксперт – клиент» является значимым фактором эффективности восстановительных тренингов: интерактивное взаимодействие эксперта с клиентом обеспечивает оптимизационные процессы на уровне вегетативной нервной системы, уменьшает уровень эмоциональной дезадаптации; автономная активность клиента вызывает чрезмерную нагрузку на регуляторные системы организма, не изменяет исходно высоких уровень эмоциональной дезадаптации; эффективность пассивного прослушивания релаксационной музыки связана с индивидуальными и ситуативными особенностями клиента.

УДК 57.032

Когнитивные функции и возраст-ассоциированные патологии. Творчество против старения

Ивашкина В.А., Захарчук А.Г., Жеребцов С.В., Спивак И.М.

Рассмотрены психологических факторы, которые потенциально могли бы противодействовать появлению возраст-ассоциированных заболеваний и старению человека в целом. На материале исследования показано, что вероятность развития нарушений в когнитивной сфере у пожилых, как правило, не зависит от наличия соматических патологий. В то же время креативность у лиц пожилого возраста связана с длиной теломер в клетках периферической крови. Уровень образования, психологические защиты и религиозность снижают уровень невротизации и могут способствовать активному долголетию. При этом более высокая образная креативность может быть обусловлена носительством аллеля A1 гена рецептора серотонина 2A (5HTR2A). Также показана ассоциация этого гена с болезнью Паркинсона и гена ангиотензиногена – с лучшим выполнением теста смысложизненных ориентаций. На основании полученных результатов разработана методика развития креативности у лиц любого возраста.

УДК 004.8

Символическая динамика, метаграфы и интеллект

Каганов Ю.Т., Гапанюк Ю.Е.

Задача обнаружения паттернов может быть поставлена как задача обучения без учителя, или задача самоорганизации. Такого рода задачи являются ключевыми при разработке теории искусственного интеллекта. В данном подходе паттерны выделяются автоматически, необходимо только поставить им в соответствие символы целевого алфавита для формирования значений целевого признака. Для обработки и преобразования метаграфов используется подход на основе метаграфовых агентов. Использование подхода на основе динамических метаграфовых агентов позволяет построить многоуровневую структуру агентов для формирования метаграфа признаков на базе физических сигналов.

УДК 612.821

Нейросетевая модель детекции известности

Казанович Я.Б.

Психологические эксперименты показывают, что емкость памяти, связанной с различением известных и новых стимулов, для определенных типов стимулов практически неограничена. В данной работе предложена модель детекции известности последовательностей целых чисел, представляющая собой трехслойную нейронную сеть с прямым потоком информации между слоями. С помощью компьютерных экспериментов показано, что при разреженном кодировании стимулов модель имеет емкость памяти, превосходящую емкость памяти в сетях хопфилдовского типа, традиционно используемых для моделирования детекции известности.

УДК 57.087+612.281

Фазовая синхронизация между медленными колебаниями потенциалов головного мозга и процессом дыхания

Каравaев А.С., Боровкова Е.И., Безручко Б.П.

В работе исследовались особенности взаимодействия медленных колебаний электроэнцефалограммы, процесса дыхания и сигналов контуров автономной регуляции кровообращения у бодрствующих здоровых людей в ходе специальных активных экспериментов, в которых частота дыхания здоровых субъектов изменялась по заданному закону. Постановка активного эксперимента в комбинации с применением методов анализа фазовой динамики позволили обнаружить захват частот и фаз медленных колебаний потенциалов отведений электроэнцефалограммы дыханием.

УДК 534.7+534:612.014+539.3

Модель волнового транспорта в сосудистой системе с учетом локальной активной регуляции

Клочков Б.Н.

Рассмотрены активные волновые процессы изменения просвета цилиндрических полых органов. Предложено математическое описание модели автоволнового транспорта внутреннего содержимого органа на основе механохимических взаимодействий. Представлены аналитические решения для нелинейных перепадных волн, определяющих активный транспорт в полых органах. Обсуждены самоорганизационные изменения формы органов применительно к лимфатическим сосудам и другим объектам живых организмов.

УДК 004.032.26+612.822.3

Разделение состояний ментального и сенсорного внимания по ЭЭГ-данным с помощью сверточных нейронных сетей

Князева И.С., Бойцова Ю.А., Макаренко Н.Г., Данько С.Г.

В работе обсуждается способ разделения состояний внутреннего, ментального, и внешнего, сенсорного, внимания по индивидуальным коротким записям электроэнцефалограмм с помощью сверточных нейронных сетей. Предложенная модель позволила достичь высокого качества классификации как для разделения ментального и сенсорного внимания, так и для разделения близких типов ментальных процессов – воспоминания и воображения. Практическая ценность полученных результатов заключается в возможности их использования для

потенциального улучшения систем нейрокомпьютерных интерфейсов. В теории, они помогают глубже понять сложные когнитивные процессы, такие как внимание, память и воображение.

УДК 2788

Овеществленное сознание в свете теории музыки

Корсакова-Крейн М.

Статья обращается к проблеме овеществленного сознания в музыке с точки зрения музыкальной теории, подчеркивая в то же время значимость неявного участия моторной системы в восприятии музыки. Такой междисциплинарный подход существен для создания нейропсихологических основ музыкальной терапии. Более того, исследование эмоций в музыке и изучение восприятия квазипространственных особенностей музыкальных структур важны для понимания человеческого сознания.

УДК 159.91+612.821

Самодетерминация актуализации опыта порождает фрактальную структуру поведения

Крылов А.К.

Автокорреляции действий, т. е. повтор того же действия в следующий момент с большей вероятностью, чем других, нарушают принцип случайности принятия решения, противоречат идее принятия решений как вероятностного выбора из альтернатив. Предполагается, что элементы опыта являются активными (системами) подобно организму (надсистеме) и, находясь в системных отношениях друг с другом, каждый элемент «сам решает», продолжать ли активацию, т. е. актуализация элемента опыта обладает свойством самодетерминации. Такое обоснованное с позиций системной психофизиологии, основанной на парадигме активности, понимание актуализации элементов опыта как самодетерминации позволяет материалистически подойти к решению вопроса о свободе выбора, о которой косвенно говорит фрактальность структуры поведения в однородной среде. В настоящей работе показано, что такой механизм имеет преимущество по сравнению с вероятностным принятием решений, по крайней мере в поисковом поведении в однородной среде – поиск глобальней.

УДК 004.93

Идентификация функции приспособленности с использованием нейронных сетей

Кузенков О.А., Кузенкова Г.В.

В настоящей работе предлагается новая методика решения задачи идентификации параметров функции приспособленности живых организмов на основе применения технологий искусственных нейронных сетей. Предложенная методика применяется к идентификации функции приспособленности наследственных стратегий ежедневных вертикальных миграций зоопланктона. Создан программный комплекс для расчета указанной функции приспособленности.

УДК 517

Математическая модель передачи информации в процессе обучения

Кузенков О.А., Кузенкова Г.В.

Исследована модель передачи конкурирующих видов неврожденной информации посредством обучения в популяции с постоянной численностью. Модель предполагает возможность для каждого носителя владеть несколькими видами передаваемой информации. Установлены условия сохранения популяцией одного вида информации. Модель может описывать процесс языкового обучения и позволяет исследовать динамику количества носителей языка.

УДК 57.023+616.89-008.42

Пролегомены к иному взгляду на природу галлюцинаций, шизофрению и нелинейная динамика

Кузнецов А.А.

В работе обосновываются взгляды, что шизофрения является расстройством временной обработки мозгом сигналов среды, а в основе слуховых галлюцинаций лежит функциональная настройка мозга больных на восприятие слабых отраженных звуковых сигналов.

УДК 159.9

Антропологический механизм передачи знаний от поколения к поколению

Лосик Г.В., Бойко И.М., Петров С.В.

С позиций кибернетики и психологии рассматриваются применительно к человеку три механизма передачи образной и знаковой информации от поколения к поколению. Акцентируется внимание на теоретически возможном четвертом механизме передачи сугубо образной информации о морально-нравственных принципах поведения от предыдущего поколения последующему. Показано, что этот антропологический механизм является самостоятельным, отличным от генетического, социально-подражательного и вербального механизмов передачи информации. Доказывается, что для реализации антропологического механизма и передатчик и приемник сообщения должны иметь сходное физическое строение и соблюдать ряд условий пребывания в социальной среде. В виде квазиэксперимента проанализированы известные психологические феномены, которые на практике подтверждают гипотезу о существовании антропологического механизма передачи информации от передатчика к приемнику. Рассмотрены случаи, когда для реализации антропологического механизма формируется отдельная субкультура общения небольшой группы людей, а также когда данный механизм реализуется вне субкультуры.

УДК 159.9

Конкуренция за ресурс дифференциации в процессе формирования психологических структур

Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С.

Работа посвящена выявлению характеристик наиболее ранних этапов дифференциации психологических структур (ПС). ПС описывается как множество компонентов, связанных отношениями различных типов. Каждый компонент ПС является носителем информационной модели цикла взаимодействия индивида с предметной областью и представлен группой нейронов, специализированных относительно данного цикла. Взаимодействия между компонентами обеспечиваются специфическими информационными моделями, которые фиксируются на группе нейронов с общей (основной) специализацией как дополнительные специализации. Предполагается, что потенциал порождения информационных моделей взаимодействий данного компонента с другими, т. е. ресурс дифференциации компонента, ограничен предельным количеством дополнительных специализаций на каждом нейроне, входящем в группу, которая фиксирует все вновь сформированные модели взаимодействий с другими компонентами ПС. Целостная ПС описывается как сложная неоднородная семантическая сеть, вершины которой представляют компоненты ПС, а дуги – отношения между ними. Установлено, что процессы дифференциации отношений у разных индивидов асимметричны; сформулировано предположение, что различные варианты конкуренции за ресурс дифференциации могут лежать в основе асимметрии интериндивидуальных ПС.

УДК 577.3

Моделирование абсансной эпилепсии сложной осцилляторной нейронной сетью

Медведева Т.М., Сысоева М.В., Люттйоханн А., Луйтелаар Ж., Сысоев И.В.

В работе предложена математическая модель пик-волновых разрядов – основных проявлений абсансной эпилепсии. Построенная модель является мезомасштабной, в ней каждый «нейрон» на самом деле представляет собой группу близких нейронов, которые делятся на возбуждающие и тормозные в зависимости от того, к какой популяции клеток они относятся (PY – пирамиды и TC – таламокортикальные клетки являются возбуждающими, IN – интернейроны и RE – ретикулярные таламические клетки являются тормозными). Интегральный сигнал нейронов, входящих в популяции PY и IN, является аналогом сигнала LFP коры, TC представляет собой совокупность клеток из VPM, а RE – из RTN.

УДК 159.95

Успешность выполнения когнитивных заданий при изменении их сложности в различных условиях

Меклер А.А., Ткачёва Л.О., Станкова Е.П., Волохонский В.Л.

Рассматриваются факторы, влияющие на успешность выполнения задания отслеживания множества объектов (Multiple

Objects Tracking task – MOT). Приведены результаты двух экспериментов, в которых оценивалась сложность выполнения MOT в разных условиях. Были выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на успешность выполнения MOT. Было выявлено, что при усложнении задания меняется стратегия отслеживания.

УДК 616.12-07

Системно-когнитивные технологии в медико-биологических исследованиях

Минина Е.Н., Ластовецкий А.Г.

Сложные системы, к которым относится и их функциональные подсистемы, не программируются, а обучаются. Обучение в данном контексте обозначает, что система учится правильно предугадывать входные данные. Она сравнивает непрерывно меняющиеся входные сигналы и информацию, имеющуюся в памяти, и прогнозирует следующие сигналы. Для обеспечения оптимального управления активными объектами и их диагностики как на детерминистских, так и на бифуркационных этапах их развития существует определенный системно-когнитивный образ реализации процессов, выявление и формализация которого в медико-биологической сфере является неизученным и мало отраженным в литературных данных объектом исследования. «Считывание», распознавание «системных функциональных образов» с использованием инновационных технических решений позволит осуществлять задачи раннего выявления изменения вектора состояния системы. Эридитарность, как качество системной памяти любой природы, позволяет прогнозировать дальнейшее течение процессов на основе предыдущей системной истории при формировании функционального следа. По результатам исследований была сформулирована классификация диагностических технологий, характеризующихся качеством когнитивности.

УДК 616.89

О формализации описания амнестического синдрома

Никонов Ю.В.

В статье предпринята попытка формализовать описание амнестического синдрома с использованием квантового формализма и нетривиальных свойств нейронных версий-следов эпизодической памяти в процессе ее реконсолидации. Предполагается, что формализм вектора двух состояний квантовой механики, дуальный формализму запутанных историй, соответствует гипотезе о существовании двух противоположно направленных времен «индивидуального» времени человека.

УДК 612.822.3

Поиск взаимосвязей между особенностями поведения взрослых испытуемых и компонентами ССП в парадигмах go/nogo и novel

Нужина Н.С., Продиус П.А., Мухина И.В.

Изучались поведенческие и нейрофизиологические особенности переработки зрительной информации в парадигме go/nogo. Использовались таблица Горбова – Шульте, тест Струпа, проверялась беглость чтения. Для задания go обнаружили наибольшее количество тенденций и связей между нейрофизиологическими характеристиками (амплитуда и пиковая латентность волны N200) обработки частых однородных сигналов и поведенческими особенностями (характеристики внимания). Для задания nogo с более редким, нерелевантным и трудно дифференцируемым от go стимулом обнаружены тенденции связей характеристик N200 и гибкости/ригидности когнитивного стиля. У испытуемых с более медленной реакцией go (менее импульсивных), гибким когнитивным стилем и высоким уровнем вербальности (т. е. имеющих более благоприятные характеристики для эффективной обработки информации) в диапазоне от 150 до 350 мс наблюдались более низкоамплитудные компоненты ССП. Эту особенность можно гипотетически рассматривать как эффективный нейрофизиологический профиль обработки информации.

УДК 004.81+577.35

Расчеты динамических процессов на модели кортикальной колонки с учетом нейрон-глиального взаимодействия

Нуйдель И.В., Соколов М.Е., Шемагина О.В.

Исследования динамических режимов генерации и распространения сигналов ориентированы на понимание фундаментальных принципов обработки информации в нейронных и нейрон-глиальных системах мозга. Разработано программное обеспечение, дающее возможность составлять каталог режимов функционирования нейрон-глиальных ансамблей, а также давать описание и интерпретации для изучаемой системы в биофизических или нейрофизиологических терминах. Проведены расчеты динамических режимов преобразования внешних сигналов в нескольких редуцированных моделях.

УДК 537.1

Становление электродинамики как модельный эволюционный эксперимент. Часть 2. Мучительная проблема истинности животного электричества

Ольшанский В.М.

Доклад продолжает тему ранней эволюционной истории электродинамики. Обсуждаются биологические истоки электродинамики и исследования животного электричества. Одним из центральных аспектов этих исследований была проблема витальности животного электричества. Под витальностью понималась посредническая роль электричества во взаимодействиях между душой и телом, предположенная Исааком Ньютоном в завершающем абзаце «Математических начал натурфилософии». Обсуждаются исследования Луиджи Гальвани, Алессандро Вольты, Генри Кавендиша, Майкла Фарадея, Карло Маттеуччи. Актуальность проблемы истинности животного электричества иллюстрируется на примере наших оригинальных исследований электрической активности рыб и амфибий.

УДК 159.9

Значение личностных качеств в проявлении характеристик принятия решений

Орлов А.В.

В исследовании методом самооценивания изучали характеристики принятия решений. Создана методика, описывающая у индивидов скорость принятия решений, потребность в информации, тщательность анализа и самокритичность в принятии решений. Установлены различия между мужчинами и женщинами по характеристикам принятия решений. Изучены корреляции принятия решений с тревожностью, самооценкой, настойчивостью, толерантностью к неопределенности и склонностью к риску.

УДК 612.8

Исследование дельта-, тета- и альфа-вызванной ритмической активности мозга человека в условиях сенсорной маскировки

Павловская М.А.

В статье обсуждаются нейрофизиологические механизмы вызванной ритмичекой активности в условиях сенсорной прямой и обратной маскировки. Показано, что восприятие маскера связано с десинхронизацией дельта-ритма и доминированием тета-ритма ССП, контролирующего компоненты *N*1, *N*2, *P*2 ССП, независимо от модальности и порядка следования стимула и, скорее всего, связано с ориентировочной реакцией на интенсивные физические параметры маскера. Увеличение дельта-колебаний ССП связано с привлечением внимания к целевому стимулу и отражется в развитии волны ожидания, негативности рассогласования и компоненте *P*300.

УДК 159.95+612.821+81-25

Динамика вегетативного обеспечения и стрессогенности промежуточного контроля процесса обучения устному переводу

Парина И.С., Парин С.Б.

В работе с помощью технологии событийно-связанной телеметрии ритма сердца исследована динамика вегетативного обеспечения и стрессогенности промежуточного контроля процесса обучения устному переводу (с немецкого на русский язык и с русского на немецкий). Установлено, что при сдаче второго экзамена уровень стрессоустойчивости испытуемых существенно повысился. Это проявилось и в статистически значимом уменьшении количества объективно зарегистрированных стресс-эпизодов на втором экзамене, и в оптимизации ряда показателей вегетативной регуляции сердечного ритма.

УДК 159.91

Образ-алгоритм как мозговой механизм действия руки предметом и произнесения слова речи

Пляшкевич В.Л.

Предлагается представление об образе-алгоритме как о механизме действия человека – действии руки предметом, произне-

сении слова речи и выполнения формы локомоции. Образ-алгоритм – это двойной образ восприятия, представленный единством сенсорного и проприоцептивного образов восприятия при выполнении собственного действия. Благодаря сенсорно-двигательной структуре образа-алгоритма человек познает предметы, осваивает пространство внешнего мира, устанавливает вербальные механизмы коммуникации и мышления, формируется первичный внутренний мир человека.

УДК 616.831:616.89-008.438.2

Цифровое психофизиологическое картирование: поиск маркеров синдрома дефицита внимания с гиперактивностью у детей

Полевая С.А., Савчук Л.В., Федотчев А.И., Селиверстова К.К., Парин С.Б.

Синдром дефицита внимания с гиперактивностью (СДВГ) является самой частой причиной нарушений поведения, трудностей обучения, школьной дезадаптации. СДВГ – одно из наиболее распространенных расстройств у детей и подростков. В нашей работе реализовано цифровое картирование психофизиологического статуса СДВГ на основе интеграции показателей сенсомоторной активности и параметров вегетативной регуляции, связанной с сенсомоторными событиями. Для цифровизации психофизиологического статуса применена технология событийно-связанной телеметрии ритма сердца. Установлено, что специфические особенности сенсомоторной активности у детей с СДВГ проявляются в увеличении времени сенсомоторной реакции в задачах разного уровня сложности по отношению к любым стимулам. При этом продолжительность моторной реакции соответствует возрастной норме, что может свидетельствовать об искажениях в когнитивном модуле функциональной системы, обеспечивающей сенсомоторную активность. Для вегетативного обеспечения сенсомоторной активности у детей с СДВГ характерна редукция центрального контура регуляции ритма сердца, значимое снижение мощности низкочастотных и высокочастотных компонентов спектра вариабельности ритма сердца, повышение напряжения регуляторных систем, сокращение количества значимых корреляций между показателями.

УДК 616.831:616.89-008.438.2

Цифровое психофизиологическое картирование: особенности сенсомоторной активности при очаговых нарушениях мозгового кровообращения

Полевая С.А., Циркова М.М., Тельных Н.А.

Для цифрового картирования когнитивных функций в широком пространстве признаков были применены интерактивные сценарии сенсомоторной активности на веб-платформе для когнитивных тренировок Apway, разработанной в ПИМУ. Установлено, что при разных уровнях сложности задачи и для разных вариантов семантики стимулов время сенсомоторной реакции у пациентов с нарушениями мозгового кровообращения больше, чем у здоровых. У пациентов с нарушениями мозгового кровообращения снижена функция когнитивного контроля и затруднены вербально-сенсорные отношения. Таким образом, показатели сенсомоторной активности в простых и сложных контекстах могут быть использованы в качестве маркеров нарушения мозгового кровообращения.

УДК 576.32/.36:577.25

Анализ механизмов влияния лептина на синаптическую пластичность в гиппокампе

Проскура А.Л., Запара Т.А., Ратушняк А.С.

Роль адипокина лептина в контроле энергетического обмена в гипоталамусе хорошо описана. Однако его мишени в центральной нервной системе не ограничены гипоталамусом, так как лептиновые рецепторы хорошо представлены в различных отделах мозга, которые вовлечены в реализацию высших когнитивных функций, включая гиппокамп. В гиппокампе продемонстрированы когнитивно-стимулирующие эффекты лептина. Он способствует связанному с гиппокампом обучению и запоминанию, тогда как нечувствительность к лептину приводит к значительным нарушениям памяти. Лептин стимулирует взрослый нейрогенез в зубчатой извилине через усиление пролиферации нейрональных предшественников. Показана связь лептина с тяжелыми нейродегенеративными патологиями. Реконструкция молекулярных путей реализации эффектов лептина в мозге, таким образом, может предоставить новое понимание его связи с когнитивными процессами и терапевтического потенциала для коррекции нейродегенеративных патологий.

УДК 004.81+577.2.01+519.722+53.02

Физические принципы функционирования биологических молекулярных информационных машин

Ратушняк А.С., Запара Т.А., Проскура А.Л., Сорокоумов Е.Д.

Для решения проблем в области искусственного интеллекта, разработки новых поколений информационных систем и коррекции нейроиндуцированных патологий необходимо понимание физических принципов, лежащих в основе механизмов мозговой деятельности и когнитивной функции. Эта задача может быть решена только в рамках принципиально новых концепций. В работе предлагается подход, основанный на понимании физических принципов, происхождения, развития и функции процессов прогнозирования, выполняемых молекулярной информационной системой для снижения энтропии на основе ранее сохраненной матрицы сигналов. На базе такого понимания негэнтропийной, прогностической природы когнитивных биосистем существует реальная возможность их реинжиниринга. Такие системы могут быть созданы из простых неэнтропийных модулей, доступных для моделирования, путем объединения их в рамках сетевых или матричных подходов.

УДК 159.91

Показатели динамики сердечного ритма и оценка эмоционально окрашенных изображений

Савицкая Т.Ю., Александров Ю.И.

В статье приводятся результаты исследования изменения выборочной энтропии сердечного ритма у участников исследования при просмотре ими эмоционально окрашенных фотоизображений. После просмотра фотоизображений, каждое из которых предъявлялось в течение минуты, участники должны были оценить его по шкале эмоциональной валентности и интенсивности. Результаты показали, что при просмотре изображений, которые оценивались как негативные с высокой эмоциональной интенсивностью, выборочная энтропия сердечного ритма снижается. Полученные результаты обсуждаются с позиций представления об эмоции как о характеристике систем низкого уровня дифференциации.

УДК 57.01+612.82+616.853

Нарушения нейросетевой ритмической активности: таламокортикальная дизритмия

Ситникова Е.Ю.

Таламокортикальная нейронная сеть, которая объединяет кору больших полушарий головного мозга (неокортекс) и подкорковую область (промежуточный мозг, таламус), – это сложная система с иерархической организацией. Таламокортикальная сеть генерирует устойчивую ритмическую активность с частотой около 8–14 Гц. Известно, что многие неврологические и психические заболевания сопровождаются сходными нарушениями таламокортикальных ритмов, т. е. таламокортикальной дизритимией. Здесь представлена концепция таламокортикальной дизритимии, предложенная Родольфо Льинасом с соавторами. Мы проводим экспериментальную работу на крысах WAG/Rij с генетической предрасположенностью к абсанс-эпилепсии, у которых аномалии таламокортикальной системы сопровождаются нарушением ритмической активности. Для исследования фундаментальных механизмов таламокортикальной дизритмии у крыс WAG/Rij мы используем частотно-временной анализ электроэнцефалограмм.

УДК 612.821.3

Распознавание ошибки по сигналам мозга в межстимульный интервал

Скакун А.И., Балаев В.В., Ефимов К.В., Котович Ю.В., Тетерева А.О., Кашеварова О.Д., Малиновская П.И., Атанов М.С., Мартынова О.В., Иваницкий Г.А.

При совершении человеком ошибки (например, при выполнении когнитивных заданий) те или иные параметры работы мозга могут характерным образом изменяться, что регистрируется в экспериментальных условиях. Впервые это было обнаружено Н.П. Бехтеревой с помощью методики определения концентрации кислорода в живых тканях. Было установлено, что в некоторых отделах мозга указанный показатель изменяется только в случае совершения человеком ошибки. Феномен затем был подтвержден в экспериментах с регистрацией ак-

тивности отдельных нейронов. Значительно позже подобные результаты были получены за рубежом с применением метода вызванных потенциалов: была открыта так называемая негативность ошибки (error-related negativity). Во всех перечисленных выше случаях нейрофизиологические маркеры ошибки были привязаны к моменту выдачи неверного ответа и регистрировались на относительно коротком интервале времени. Мы обнаружили, что факт совершения человеком ошибки отражается также в тонической активности определенных ритмов мозга после снятия задания на протяжении нескольких секунд. Эффект был получен с помощью ранее разработанной нами методики определения характера выполняемой умственной работы по ритмам ЭЭГ. В межстимульной ритмической активности мы также увидели признаки незавершенности задания, т. е. обнаружили нейрофизиологические корреляты процессов, ответственных за так называемый эффект Зейгарник.

УДК 530.182

Традиция когнитивного подхода научных школ Мандельштамма – Андронова – Неймарка

Сляднев С.Е., Панкрашкина Н.Г., Хроматов В.Е.

Сделан экскурс в историю науки и, в частности, Горьковской школы теории нелинейных колебаний, дана характеристика научных школ узкого и широкого профилей (руководители Л.И. Мандельштам и А.А. Андронов соответственно).

УДК 159.91+612.821

Научение чередованию двух форм поведения как формирование индивидуального опыта

Созинов А.А., Бахчина А.В., Жиганов Л.С., Гринченко Ю.В., Александров Ю.И.

Прерывание одного поведения и переход к выполнению другого связаны к затратами времени и умственным напряжением, приводящими с снижению эффективности выполнения чередуемых заданий. Изменчивость и разнообразие проявлений переключения принято объяснять содержанием процессов исполнительного контроля. Мы полагаем, что поведение чередования следует рассматривать как процесс научения, предполагающий формирование нового и модификацию ранее сформированного опыта. В настоящей работе мы используем показатели поведения индивидов для проверки двух следствий. Во-первых, продолжительность перехода к выполнению задания и ее динамика связаны с последовательностью предъявления заданий в ходе обучения. Во-вторых, по мере формирования чередования меняется время выполнения актов чередуемых форм поведения. С нашей точки зрения, эти результаты соответствуют представлению о том, что научение чередованию и научение чередуемым формам поведения подчиняются общим закономерностям.

УДК 159.91

Психофизиологические закономерности решения межгрупповых конфликтных ситуаций при вариации условий социального присутствия

Созинова И.М., Александров Ю.И.

При сопоставлении результатов двух серий экспериментов (решения моральных дилемм при варьировании условий социального присутствия) не было обнаружено различий в общей доле поддержки членов «чужих» групп на разных этапах онтогенеза, но был обнаружен более поздний переход к преобладающей стратегии поддержки членов «чужих» групп у детей, решавших дилеммы на планшете по сравнению с детьми, решавшими дилеммы при взаимодействии с экспериментатором. Вероятно, снижение степени социального присутствия может приводить к снижению «сознательного» контроля собственного поведения и сопровождаться процессами временной системной дедифференциации – обратимого снижения вклада более дифференцированных систем индивидуального опыта в реализуемое. Ситуация решения дилемм на планшете является более трудной для детей на разных этапах онтогенеза, так как отсутствует социальное окружение, которое так или иначе транслирует моральные правила. Полученные результаты вносят вклад в понимание специфики социализации в телекоммуникативной среде, а также значения непосредственного контакта со взрослым для понимания и интериоризации моральных норм.

УДК 57.01+612.82+616.853+530.18

Реконструкция сети нейроосцилляторов по экспериментальным данным локальных потенциалов мозга

Сысоев И.В., Lüttjohann A.K.

Был разработан подход по реконструкции ансамблей обобщенных осцилляторов Ван-дер-Поля. Подход дает возможность по векторным временным рядам колебаний ансамбля (по одному скалярному ряду от каждого элемента) реконструировать систему связей и собственные нелинейные функции отдельных элементов, если они могут быть представлены в виде осцилляторов типа Ван-дер-Поля, Рэлея, Фитц-Хью – Нагумо или иных систем второго порядка. В работе подход адаптировался для сигналов локальных потенциалов крыс при абсансных приступах. Рассматривались временные ряды локальных потенциалов крыс линии WAG/Rij (генетические модели абсансной эпилепсии) из 8 отведений: 3 слоев соматосенсорной коры, 2 частей ретикулярного ядра таламуса, а также антериального, вентропостериального медиального и постериального ядер. Ряды были получены во время многочасового эксперимента с предварительно вживленными электродами. Применимость подхода обосновывается тем, что во время пик-волновых разрядов колебания отдельных нейронов синхронизуются и их динамику можно упрощенно моделировать в виде системы связанных осцилляторов второго порядка с шумом. С использованием данного подхода удалось получить ряд характеристик сигналов индивидуальных отведений и связей.

УДК 57.01+612.82+616.853

Результат введения агониста CB_1-рецепторов (WIN55,212-2) крысам линии WAG/Rij

Сысоева М.В., Van Rijn C.M., Сысоев И.В.

Цель работы – исследовать изменения функциональной связности в кортикогиппокампальной сети, вызванные введением агониста эндоканабиноидных рецепторов WIN55,212-2 крысам с генетической абсансной эпилепсией. В частности, выявить перестройки в сети, могущие предшествовать или соответствовать усилению, ослаблению или качественному изменению эпилептиформной активности; исследовать изменения связанности со временем, сопровождающие инициацию и прекращение приступа в зависимости от того, был ли этот приступ спонтанным или протекал на фоне введения WIN55,212-2. Показано, что введение WIN55,212-2 приводит к активизации затылочной доли коры (или структур под ней), а также к увеличению проводимости сигналов к гиппокампу (лимбической системе).

УДК 612.821.2+159.91

Особенности окуломоторной активности у людей, склонных к нарушениям пищевого поведения

Сычева Е.Е., Полевая А.В.

В данной работе анализируются специфические особенности окуломоторной активности у людей, склонных к нарушениям пищевого поведения. Для этого используется технология eye-tracking, позволяющая отслеживать окуломоторную активность при чтении текстов, связанных с тематикой «еда». Представлены результаты экспериментов, направленных на поиск различий в восприятии информации между испытуемыми с нарушениями пищевого поведения и условно-здоровыми испытуемыми. Данное исследование может впоследствии послужить основой для объективизации методик диагностики расстройств пищевого поведения благодаря оценке связанных с нарушением пищевого поведения психофизиологических маркеров, в частности параметров движения глаз при чтении текстов.

УДК 159.9.07

Сравнительный анализ характеристик текстовых и игровых задач

Тищенко А.Г., Апанович В.В., Созинов А.А., Цхадаиа Л.Г., Александров Ю.И.

В работе представлен подход к решению проблемы отбора задач для психологического исследования, соответствующих определенным критериям. Проводится сопоставление текстовых и игровых задач, а также концептуальной модели структуры поведения. Получены результаты о сходстве количественных и качественных характеристик решения текстовых и игровых задач. Делается предположение о возможной многозвеньевой организации задач, что, в свою очередь, может обеспечить выделение этапов в циклах взаимодействия (решения) с задачей.

УДК 159.9

«Образный» Интернет для кругового осмотра музейных статуй

Ткаченко В.В., Лосик Г.В., Дерюгин А.А.

В научной школе Е.Н. Соколова (МГУ) разработано новое направление – «векторная психофизиология». Векторный принцип кодирования информации позволяет реализовать в компьютере антропометрический критерий сходства формы двух трехмерных предметов. Поэтому для создания «образного» Интернета нами предложен интегральный критерий: к критерию метрического объективного сходства предметов добавлен критерий сходства карты осмотра одного и того же объемного предмета разными субъектами.

УДК 612.82

Конвергентные исследования нейрокогнитивных процессов головного мозга и иммунологического статуса больных шизофренией

Ушаков В.Л., Малашенкова И.К., Захарова Н.В., Шараев М.Г., Масленникова А.В., Arsalidou M., Вартанов А.В., Мамедова Г.Ш., Карташов С.И., Орлов В.А., Малахов Д.Г., Крынский С.А., Хайлов Н.А., Енягина И.М., Огурцов Д.П., Архипов А.Ю., Стрелец В.Б., Дорохов В.Б., Сбоев А.Г., Селиванов А.А., Молошников И.А., Величковский Б.М., Костюк Г.П.

Была разработана экспериментальная методика и проведены функциональные МРТ (фМРТ) и иммунологические исследования с предъявлением испытуемым словосочетаний, выбранных из анамнеза, которые произносил испытуемый при госпитализации или в ходе последующего лечения, когда описывал свое состояние. Полученные предварительные результаты показали, что применение выбранных индивидуальных стимулов и объединение функциональной МРТ исследований с данными МРТ-совместимого полиграфа (МРТсП) дает возможность получить корректную оценку активности нейронных структур, определить конкретные зоны мозга, вовлеченные в процесс работы с личностно-значимой для испытуемого информацией (собственного имени, эмоционально-значимые стимулы, отобранные психофизиологическим тестированием из анамнеза) и обнаружить (с помощью МРТсП) различную динамику реагирования отдельных зон мозга, обусловленную индивидуальными психофизиологическими особенностями испытуемого.

УДК 612.821.88+530.145.3

Модели эвристической работы мозга

Филатова О.Е., Еськов В.В., Филатова Д.Ю., Башкатова Ю.В.

Из-за отсутствия статистической устойчивости выборок x_i, описывающих параметры организма, мы предлагаем другие методы и модель. Они основываются на расчетах параметров квазиаттракторов и использовании искусственных нейросетей в особых режимах их функционирования. В рамках эффекта Еськова – Зинченко (ЭЕЗ) было доказано, что нейросети мозга (НСМ) работают в двух особых режимах. Во-первых, отсутствует статистическая устойчивость выборок электроэнцефалограмм (ЭЭГ), которые получены от одного и того же испытуемого в режиме многократных повторений регистрации ЭЭГ (с одной и той же точки мозга). Во-вторых, любые параметры $x(t)$ ЭЭГ показывают непрерывное изменение, т. е. отсутствуют стационарные режимы НСМ, нет точек покоя. Поэтому задачу идентификации главных диагностических признаков x_i^* (параметров порядка x_i^*) в рамках стохастики невозможно решить (выборки непрерывно статистически изменяются). Предлагается использовать для этих целей (в системном синтезе) искусственные нейросети (НЭВМ) в режиме хаоса и многократных реверберацій ($N \geq 1000$). Такой режим работы НЭВМ приближает эти нейросети к работе реальных НСМ.

УДК 004.896+004.832

Использование глубоких сверточных сетей для обнаружения дорожных знаков в задаче автовождения

Фомин И.С., Орлова С.Р., Бахшиев А.В.

В настоящее время в мире наблюдается повышенный интерес к развитию технологий автономного вождения и автоматизации транспорта. В области систем технического зрения это привело к актуализации задач, связанных с обнаружением элементов дорожной обстановки – линий дорожной разметки, знаков, транспортных средств, пешеходов и т. д. Для множества таких задач уже много лет существуют решения, основанные на классических методах технического зрения и машинного обучения, однако применение нейронных сетей позволило достичь в большинстве случаев больших точности и скорости работы, что важно для задач создания автономных транспортных средств. В статье отражены результаты решения задачи обнаружения российских знаков дорожного движения на основе глубоких сверточных нейронных сетей. Также изучается влияние различных условий и параметров обучения на конечный результат.

УДК 004.8+530.182+534-143

Когнитивные методы и алгоритмы адаптированного к изменчивости среды мультистатического подводного наблюдения

Хилько А.И., Хоботов А.Г., Хилько А.А., Калинина В.И.

Исследуются физические принципы сетецентрического гидроакустического наблюдения с использованием зондирующих сигналов и пространственно-частотных фильтров приемных систем, адаптированных к параметрам нестационарных и пространственно неоднородных океанических волноводов. Анализируются нейроноподобные методы и алгоритмы управления мультистатической системой гидроакустического наблюдения при поиске и принятии интегральных решений с использованием данных оперативной океанографии.

УДК 004.8+530.182+534-143

Исследование эффективности нейроноподобных процедур свертки при подводной локации

Хоботов А.Г., Калинина В.И., Хилько А.И., Беллюстин Н.С.

Методами стохастического моделирования исследована робастность алгоритмов сравнения на основе нейроноподобных процедур свертки при подводной локации. Приводятся результаты сравнения устойчивости различных сверточных методов сравнения.

УДК 004.8

Информационный подход к цифровой регистрации сигналов

Хоботов А.Г., Хилько А.И., Тельных А.А.

Исследуются проблемы регистрации сигналов сложной природы в условиях помех, возникающих из-за недостаточного динамического диапазона при их цифровом представлении. Рассматриваются информационные критерии квантования амплитуды сложных сигналов. Формулируется информационно-аналитический подход к задаче регистрации сигналов, ориентированный на максимальное извлечение количества информации. Представлены примеры повышения качества сигналов, измеряемых при наблюдении биофизических объектов.

УДК 159.9

Соотнесение субъективного восприятия цвета и порогов цветоразличения с уровнем тревожности человека

Хрисанфова Л.А., Шивоева Д.А.

Изучалась взаимосвязь личностной тревожности человека, его субъективных цветовых предпочтений, с одной стороны, и порогов цветоразличения, с другой стороны. Кроме того, изучалась взаимосвязь нервно-психической устойчивости, наличия тревог, энергетической установки, эмоциональной чувствительности и выраженности стрессовых реакций с порогами цветоразличения. Методы исследования: шкала тревоги Дж. Тейлора (адаптация В.Г. Норакидзе), ТЦО М. Люшера для измерения эмоциональных характеристик, метод компьютерной цветовой кампиметрии для измерения порогов цветоразличения. Испытуемые (мужчины): пожарные (N = 79) и студенты-математики (N = 54). Основная гипотеза: различные уровни личностной тревожности, эмоциональные особенности и субъективное восприятие цвета связаны с порогами цветоразличения. Обнаружено следующее. Высоко тревожные испытуемые значимо более чувствительны ко всему цветовому диапазону. Наиболее чувствительны высоко тревожные испытуемые к синему цвету. Испытуемые со средневысокой тревожностью наиболее чувствительны к красному цвету и различают больше оттенков красного. Эмоциональная чувствительность больше характерна для испытуемых со средневысоким уровнем тревожности. Высоко тревожные испытуемые субъективно

предпочитают черный цвет. Выраженность стрессовых реакций характерна для людей с высоким уровнем тревожности либо определяется характером профессиональной деятельности.

УДК 57.024+57.053

Что скрывает нейродинамика мозга? (Современные данные и модель)

Цукерман В.Д.

На основе современных данных о гиппокампальной формации мозга и модельных исследований автора рассмотрена гипотеза о функции гиппокампа как структуры категоризации высокоуровневых представлений на основе концептуального обучения и формирования реляционной базы знаний. На простых примерах показано распределенное представление треков памяти эпизодов пространственного поведения, кодирование и вызов с помощью «концепт-клеток» многочисленных изоморфных представлений в нейронных сетях с четным циклическим торможением (ECI-сети). Представленные результаты модельных исследований определяют дальнейший путь к созданию микросхемной организации нейронов, малые разреженные группы которых образуют концепт-клетки, с долговременной памятью на синаптическом уровне индивидуальных нейронов.

УДК 72.01+159.9

Когнитивная урбанистика как исследование восприятия городской среды: задачи развития, состояние, перспективы

Чеберева О.Н.

Автор статьи анализирует возможности приложения разработок психофизиологов к градостроительной сфере в свете исторического обзора развития экспериментальной психологии и ее связи с теорией формальной композиции для архитектурно-дизайнерских целей.

УДК 004.8+004.942

Символьное мышление роботов

Шумский С.А.

Рассмотрено машинное обучение с подкреплением, т. е. формирование алгоритма целенаправленного поведения системы с максимальным ожидаемым долговременным выигрышем на основании внешних подкрепляющих сигналов. Предложен метод поэтапного обучения все более сложным и протяженным во времени поведенческим навыкам и использования их для составления и коррекции долговременных планов. Целенаправленное поведение формируется иерархической обучающейся системой, в которой каждый иерархический уровень ответственен за свой временной масштаб поведения.

NONLINEAR DYNAMICS IN COGNITIVE RESEARCH – 2019
Proceedings of the VI All-Russian Conference

Edited by *V.A. Antonets, S.B. Parin, and V.G. Yakhno*

Nizhny Novgorod, IAP RAS, 2019

The proceedings contain papers presented at the VI All-Russian Conference “Nonlinear Dynamics in Cognitive Research – 2019” (Nizhny Novgorod, September 23–27, 2019). The conference is dedicated to the current state, perspectives and new opportunities of experimental research and a formalized description of cognitive processes, as well as to the problems of developing simulators of living systems.

The topics covered at the conference sections include mechanisms and models of adaptive and mental processes in cognitive systems; approaches and tools for studying the functional dynamics of living and technical cognitive systems; applied issues of modeling and registration of cognitive processes.