Российская академия наук
Институт прикладной физики РАН
Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований
Российская ассоциация нейроинформатики
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет ВШЭ
Сургутский государственный университет ХМАО-Югры
Нижегородская государственная медицинская академия
ЗАО «Нижегородское агентство наукоемких технологий»

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2015

ТРУДЫ
IV ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2015

Программный комитет конференции

Председатель:

Анохин Константин Владимирович (НИЦ «Курчатовский институт», ИНФ им. П.К. Анохина, Москва)

Заместители председателя:

Александров Юрий Иосифович (Институт психологии РАН, Москва)
Сергеев Александр Михайлович (ИПФ РАН, Н. Новгород)
Черниговская Татьяна Владимировна (СПГУ, Санкт-Петербург, НИЦ «Курчатовский институт», Москва)

Члены программного комитета:

Антонец Владимир Александрович (ННГУ, ИПФ РАН, Н. Новгород)
Величковский Борис Митрофанович (НИЦ «Курчатовский институт», Москва)
Гурбатов Сергей Николаевич (ННГУ, Н. Новгород)
Григорьева Вера Наумовна (НГМА, Н. Новгород)
Дорожкин Александр Михайлович (ННГУ, Н. Новгород)
Дунин-Барковский Виталий Львович (ЦОНТ НИИСИ РАН, Москва)
Жданов Александр Аркадьевич (ИТМиВТ РАН, Москва)
Еськов Валерий Матвеевич (СурГУ ХМАО-Югры, Сургут)
Иваницкий Алексей Михайлович (ИВНДиНФ РАН, Москва)
Казанцев Виктор Борисович (ННГУ, Н. Новгород)
Кибрик Андрей Александрович (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)
Крылов Андрей Константинович (Институт психологии РАН, Москва)
Подладчикова Любовь Николаевна (НИИ НК ЮФУ, Ростов-на-Дону)
Полевая Софья Александровна (ННГУ, НГМА, Н. Новгород)
Парин Сергей Борисович (ННГУ, Н. Новгород)
Ратушняк Александр Савельевич (КТИ ВТ СО РАН, Новосибирск)
Редько Владимир Георгиевич (ЦОНТ НИИСИ РАН, Москва)
Станкевич Лев Александрович (СПИИ РАН, Санкт-Петербург)
Самарин Анатолий Иванович (НИИ НК ЮФУ, Ростов-на-Дону)
Филатова Ольга Евгеньевна (СурГУ ХМАО-Югры, Сургут)
Чернавский Дмитрий Сергеевич (ФИ РАН, Москва)
Чернавская Ольга Дмитриевна (ФИ РАН, Москва)
Шахов Борис Евгеньевич (НГМА, Н. Новгород)
Щербаков Виталий Иванович (НГПУ им. К. Минина, Н. Новгород)
Яхно Владимир Григорьевич (ИПФ РАН, Н. Новгород)

Оргкомитет конференции

Сергеев Александр Михайлович (ИПФ РАН, Н. Новгород) – *председатель*
Яхно Владимир Григорьевич (ИПФ РАН, Н. Новгород) – *зам. председателя*
Парин Сергей Борисович (ННГУ, Н. Новгород) – *зам. председателя*
Нуйдель Ирина Владимировна (ИПФ РАН, Н. Новгород) – *ученый секретарь*
Антонец Владимир Александрович (ННГУ, ИПФ РАН, Н. Новгород)
Беллюстин Николай Сергеевич (НИРФИ, Н. Новгород)
Баевский Юрий Евгеньевич (НИУ ВШЭ, Н. Новгород)
Воловик Михаил Григорьевич (НижНИИТиО Минздравсоцразвития, Н. Новгород)
Казанцев Виктор Борисович (ННГУ, Н. Новгород)
Ковальчук Андрей Викторович (ИПФ РАН, Н. Новгород)
Полевая Софья Александровна (ННГУ, НГМА, Н. Новгород)
Соколов Максим Евгеньевич (ИПФ РАН, Н. Новгород)
Тельных Александр Александрович (ИПФ РАН, Н. Новгород)
Шемагина Ольга Владимировна (ИПФ РАН, Н. Новгород)

Редакционная коллегия:

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

Конференция организована при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований
(грант № 15-02-20274, договор № Ор 15-02-20274\15 от 08.04.2015)

Электронный адрес оргкомитета: nuidel@appl.sci-nnov.ru
Веб-сайт конференции: http://www.nd-cogsci.iapras.ru/2015/

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 6

Аверкина Л.А. Дискурс как социальная деятельность 9

Александров И.О., Максимова Н.Е. Оценка согласованности гетерохронных процессов дифференциации различных составляющих структуры знания 12

Алексеев А.К. О ценной информации в задачах усвоения данных наблюдений 16

Антонец В.А., Яхно В.Г. Методологические проблемы интеграции гуманитарных и естественно-научных подходов в изучении процессов мышления 19

Антонец В.А., Алешин К.Н., Харитонов А.А., Чевачин А.А. Фонетика речи: акустико-моторная динамическая система? 23

Бахчина А.В., Серова М.С., Синеокова Т.Н., Буланов Н.А., Полевая С.А. Билингвальный тест Струпа как способ отображения лингвистических функций мозга 27

Бахчина А.В., Демарева В.А., Синеокова Т.Н. Поиск вегетативных коррелятов лингвистических характеристик устной речи на материале диалогов на иностранном языке студентов языкового вуза 30

Бахшиев А.В., Смольников Б.А., Леонтьев В.А., Гунделах Ф.В., Мусиенко П.Е. Разработка и моделирование внешней системы поддержания динамической устойчивости человека с нарушением функции поддержания равновесия 33

Беллюстин Н.С., Савельев В.Ю., Сизов Ю.А. О закономерностях эволюционной динамики систем, формирующих когнитивные элементы 37

Белоусов К.И. Когнитивное моделирование исследовательской деятельности научных коллективов 39

Берестин Д.К., Шакирова Л.С., Романчук А.Л., Козлов А.С., Черников Н.А. Квазиаттракторы морфометрических параметров организма человека как пример эволюции complexity 41

Бронфельд Г.Б. Сохранение, передача и использование знаний на основе технологии «прямого наложения знаний» 45

Великова С. Оптимизация когнитивной нейротерапии при помощи электроэнцефалографии 48

Витяев Е.Е. Обнаружение «естественных» понятий 51

Вохмина Ю.В., Еськов В.В., Горбунов Д.В., Шадрин Г.А. Хаотическая динамика параметров электроэнцефалограмм 55

Гай В.Е., Утробин В.А. Информационная модель слухового восприятия 58

Голубев А.М., Дорошева Е.А. Модификация метода мотивационных индукторов Ж. Ньюттена 61

Громов К.Н., Радченко Г.С., Федотчев А.И., Корсакова-Крейн М.Н. ЭЭГ корреляты ступени переориентации тональной схемы в контролируемых музыкальных стимулах и фрагментах классических произведений 64

Грубов В.В., Храмов А.Е., Короновский А.А., Ситникова Е.Ю. Перемежаемость в поведении таламо-кортикальных осцилляторных паттернов на ЭЭГ крыс с предрасположенностью к абсанс-эпилепсии 68

Дегтерев А.А., Бурцев М.С. Исследование динамики развития спонтанной пачечной активности модели сети нейронов с долговременной синаптической пластичностью 71

Дмитриева Л.А., Зорина Д.А., Куперин Ю.А., Мурышкина А.И., Сметанин Н.М. Развитие и применение методов мультифрактального анализа для исследования ЭЭГ в состоянии фона и медитации 75

Дмитриева Л.А., Зорина Д.А., Куперин Ю.А., Чепилко С.С. Изучение EMD-разложений сигналов ЭЭГ методом локальных показателей разбегания на реконструированных аттракторах 78

Дорожкин А.М. О проблемах, возникающих при попытках интеграции гуманитарных и естественно-научных подходов к изучению когнитивных процессов 81

Драницына А.А. О необходимости разработки гипотезы о квантово-механической модели процесса работы полимераз и рибосом при синтезе биополимеров ДНК/РНК и белков 83

Евтушенко А.И. Асимптотическое упорядочивание поведения слабосвязанной системы автономных агентов на основе модели зеркальных нейронов 86

Еськов В.В., Семерез О.Б., Блинов А.В., Эльман К.А. Использование нейроэмуляторов в разрешении неопределенности 1-го типа при анализе кардиоинтервалов 91

Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В., Зимин М.И. Параметры квазиаттракторов при анализе нелинейных процессов в генерации биопотенциалов 95

Еськов В.М., Даянова Д.Д., Вохмина Ю.В., Пахомов А.А. Влияние вариаций параметров нейросети на стохастическую устойчивость тремора 98

Еськов В.М., Хадарцев А.А., Филатова О.Е., Еськов В.В. Хаотическая динамика параметров гомеостаза – особый тип нелинейных систем 101

Запара Т.А., Проскура А.Л., Вечкапова С.О., Ратушняк А.С. Нейронные сети и молекулярные системы, контролирующие эффективность межнейронных связей 105

Зорина З.А., Смирнова А.А., Обозова Т.А. Сравнительный анализ высших когнитивных способностей птиц: эксперименты в лаборатории и в природе 108

Иваницкий Г.А. Информативная ЭЭГ 112

Казимирова Е.Д. Подбарьерный переход в аппарате мышления 115

Калинина С.Я., Антонец В.А., Григорьева В.Н. Результаты выполнения мануальных тестов на программно-аппаратном комплексе «Hand-tracker» 117

Комарова М.В., Комольцев И.Г., Тишкина А.О. Применение многомасштабного корреляционного анализа к обработке электрических сигналов с поверхности мозга животных при исследовании посттравматической эпилепсии 119

Королева М.Е., Бахчина А.В., Хоборов С.В., Парин С.Б., Полевая С.А. Вегетативное обеспечение процесса социального взаимодействия в ситуации монолога и полилога 123

Корсакова-Крейн М.Н. «Овеществленное» сознание и восприятие музыки 125

Крылов А.К. Моделирование динамики научения при формировании и реорганизации навыка 129

Левенец Я.В., Пантелеева С.Н., Резникова Ж.И., Рябко Б.Я. Применение нового метода, основанного на колмогоровской сложности, к анализу биологических «текстов» на примере охотничьих стереотипов мелких млекопитающих 132

Лобов С.А., Дудник А.В., Виллакорта-Атиенза Х., Макаров В.А. Управление верхней конечностью робота с помощью когнитивной модели, основанной на компактном внутреннем представлении 136

Лосик Г.В., Килин С.Я., Кульчицкий В.А. Векторный принцип кодирования в мозге образной информации 137

Макаренко Н.Г. Обучение гомологиям из облака точек 141

Макаров В.А. Компактное внутреннее представление когнитивных процессов 143

Максимова Н.Е., Александров И.О., Турубар Д.С. Топологические свойства семантической сети, представляющей структуру знания: неоднородность и безмасштабность 144

Малафеев А.Ю., Дружков К.А. На пути к автоматическому определению интолерантности высказываний в политическом дискурсе и СМИ 147

Непомнящих В.А., Осипова Е.А., Панкова Н.А. Спонтанная организация исследовательского поведения рыб 149

Николаева Е.И., Вергунов Е.Г., Добрин А.В. Нелинейные методы анализа кардиограммы ребенка, записанной в нейтральном и эмоциональном состояниях 152

Никонов Ю.В. О моделировании многослойных сетей коннектома – когнитома на примере этанол-зависимой функциональной системы 155

Нуйдель И.В., Соколов М.Е. Исследование механизмов переходных процессов от режимов нормальной обработки сигналов к режимам эпилептиформной активности 159

Павловская М.А., Айдаркин Е.К. Вызванная ритмическая активность мозга человека в условиях сенсорной маскировки 163

Парин С.Б. Трехкомпонентная теория механизмов стресса 166

Парина И.С. Фразеологизмы: теоретические представления *vs.* корпусные исследования 170

Петухов А.Ю., Полевая С.А. Моделирование динамики информационных образов в социуме методом коммуникативного поля 173

Подладчикова Л.Н., Колтунова Т.И., Шапошников Д.Г., Ломакина О.В. Индивидуальные особенности траекторий осмотра эмоционально значимых изображений 177

Полевая С.А., Парин С.Б., Некрасова М.М., Елисеев М.Е., Крупа В.В., Шишалов И.С., Еремин Е.В. Картирование острого стресса и стрессогенных событий у водителей в контексте обучения и профессиональной деятельности 179

Продиус П.А., Нужина Н.С., Мухина И.В. Нейрофизиологические особенности категоризации конкретных и абстрактных слов с негативным и нейтральным праймом 183

Пряхин В.Ф. О мировоззренческих аспектах исследований в области искусственного интеллекта 185

Ратушняк А.С., Проскура А.Л., Запара Т.А. Анализ молекулярной структурно-функциональной архитектуры нейрона как базового элемента когнитивных систем ... 187

Рахилина Е.В. Лингвистический эксперимент: in vivo vs. in vitro ... 190

Редько В.Г., Непомнящих В.А., Осипова Е.А., Шарипова Т.А., Бесхлебнова Г.А. Моделирование когнитивных способностей рыб, осваивающих лабиринты ... 191

Редько В.Г. Моделирование когнитивной эволюции – перспективное направление междисциплинарных исследований ... 195

Романова Т.В. Моделирование языкового сознания на основе данных когнитивного эксперимента ... 198

Руннова А.Е., Грубов В.В., Храмов А.Е., Короновский А.А., Куровская М.К. Экспериментальное исследование и моделирование восприятия бистабильных объектов ... 201

Савченко А.В., Милов В.Р. Последовательный иерархический подход в задаче классификации аудиовизуальной информации ... 203

Савченко Л.В. О применении нечетких решений для повышения точности распознавания изолированных слов русского языка ... 207

Савчук Л.В., Полевая С.А., Федотчев А.И., Циркова М.М. Психофизиологические маркеры синдрома дефицита внимания с гиперактивностью у школьников младшего школьного возраста ... 211

Сварник О.Е. Латентные изменения состояния системы памяти о навыке ... 213

Ситникова Е.Ю., Грубов В.В., Короновский А.А., Храмов А.Е. Ритмы головного мозга: абсанс-эпилепсия и сонные веретена ... 216

Созинов А.А., Гринченко Ю.В., Казымаев С.А., Александров Ю.И. Показатели стабильности и динамики мозгового обеспечения нового поведения ... 220

Соколов И.С. Кластерный анализ спонтанной активности нейрональных культур *in vitro* ... 223

Соколова Е.С., Тельных А.А., Беллюстин Н.С. Исследование динамики конвективных ячеек в атмосфере Земли по независимым критериям анализа радиолокационного изображения ... 225

Твердислов В.А. Хиральный дуализм как системный фактор иерархического структурообразования в биологических системах ... 227

Уфимцева Н.В. Ассоциативная база данных как модель обыденного языкового сознания ... 228

Федотчев А.И., Бондарь А.Т. Механизмы генерации электрической активности мозга, нелинейные взаимодействия ЭЭГ ритмов и регуляция состояний ЦНС ... 230

Филатов М.А., Филатова Д.Ю., Григоренко В.В., Сидоренко Д.А. Теория функциональных систем П.К. Анохина с позиций нелинейной динамики и теории самоорганизующегося хаоса ... 234

Филатов М.А., Поскина Т.Ю., Сидоренко Д.А., Стрельцова Т.В. Моделирование динамики параметров памяти человека в норме и при патологии ... 238

Фортунатов А.Н., Фортунатов Н.М. Искусство как сверхсложная система ... 241

Фортунатова В.А. Концентрированные модели как ресурс реновации гуманитарного знания в современных условиях ... 244

Хапов И.В., Комольцев И.Г., Габова А.В., Кузнецова Г.Д. Анализ частотно-временной динамики эпилептических разрядов разного типа с помощью модифицированного преобразования вейвлет ... 248

Цукерман В.Д., Кулаков С.В., Золотухин В.В. Реляционная эпизодическая память в логдинамическом мозге ... 251

Чеберева О.Н. Архитектура как информация ... 255

Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Никитин А.П., Щепетов Д.С. Естественно-конструктивистский подход к моделированию мышления: интерпретация эмоций в искусственной когнитивной системе ... 259

Чернавский Д.С., Чернавская О.Д., Карп В.П., Никитин А.П. Естественно-конструктивистский подход к моделированию мышления: сопоставление с другими подходами и экспериментом ... 263

Черниговская Т.В., Прокопеня В.К. Интерпретация контекста как характеристика нелинейности структуры ментальной грамматики: экспериментальное исследование референции ... 266

Эйнгорин М.Я. К математическим основам памяти живых систем ... 269

Яхно В.Г. Взгляд на теорию управления живыми системами ... 271

Авторский указатель ... 275

Предисловие

По-видимому, наш мозг должен сначала независимо сформировать образы признаков, прежде чем мы сможем найти их в реальных объектах... Знание не может возникнуть на основе одного лишь опыта, оно создается только в процессе сопоставления результата интеллектуальной деятельности с наблюдаемыми фактами.
Альберт Эйнштейн (1949) (см. [1, с. 68])

В сборнике содержатся материалы пленарных лекций, секционных и постерных докладов IV всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях», на которой планируется обсудить проблемы математического, физического и биологического моделирования искусственных и естественных интеллектуальных систем, новые методы измерения, обработки и интерпретации экспериментальных данных; будут широко представлены социогуманитарный и лингвистический аспекты когнитивных исследований. Конференция призвана способствовать сближению понятийных и методологических платформ естественно-научного и гуманитарного знания. Организаторы предыдущих конференций [2] были вдохновлены возможностями использования физических методов в познании механизмов управления в живой природе. Это отразилось, в частности, в выбранном названии конференции: термин «нелинейная динамика» указывает на приоритетное использование соответствующих методов для формализованного описания нейроноподобных механизмов обработки информационных сигналов; сочетание «в когнитивных исследованиях» подчеркивает возможность их использования в разнообразных областях деятельности человека.

Когнитивная наука – это наука междисциплинарная, которая интегрирует усилия ученых разных специальностей (психологов, социологов, философов, лингвистов, психолингвистов, математиков, программистов, кибернетиков, антропологов и др.), чтобы получить наиболее полное и адекватное представление о таком сложном феномене природы, как человеческое сознание и разум. Именно эту задачу имели в виду организаторы, подчёркивая междисциплинарный статус конференции. На предыдущих конференциях была показана возможность реализации техническими системами широкого спектра конкретных функциональных операций, которые присущи живым системам. Однако механизмы управления живыми системами в естественных условиях демонстрируют большую гибкость и адекватность реакций на изменения внешнего мира, чем разработанные до сих пор их технические аналоги. Поэтому для многих исследователей актуально расширение областей исследований для лучшего понимания механизмов функционирования живых систем, для повышения точности и адекватности прототипам разрабатываемых элементов симулятора живых систем. Например, в работах [1, 3–5] продемонстрированы подходы на основе функциональных моделей, важность учета иерархичной структуры в управлении данными и знаниями, существенное (хотя иногда и неосознаваемое) влияние социальных процессов, мотивирующих тот или иной режим функционирования объекта изучения, приоритетность нравственных и этических норм в проводимых исследованиях и разработках. Показано, что выбор приоритетов (например, из такого набора параметров, как: обеспечение «потребностей тела» субъекта; следование «социальным стереотипам»; волевая реализация «собственных планов»; учет «контекстной обстановки» и выработка компромиссов) сильно меняет динамику поведения (строй психики) субъекта, что может приводить к сильным отклонениям от исходно планировавшейся деятельности [3, 4]. Адекватное поведение субъекта в естественной среде возможно лишь при формировании у него «мозаичного» мировоззрения с учетом шести приоритетов обобщенных средств управления [3], среди которых: владение методологическими и управленческими знаниями; научные методики, технологии, идеологические, религиозные взгляды; деньги, кредитно-финансовая система и другие. То есть при разработке элементов симулятора живых систем достижение адекватности изучаемому объекту возможно лишь при учете упомянутых параметров. Именно это побудило представителей оргкомитета обратиться к участникам конференции с просьбой высказаться в своих докладах по следующим вопросам:

Существуют ли методологические проблемы при интеграции гуманитарных и естественно-научных подходов в изучении различных когнитивных процессов?

Возможно ли построение классификации состояний искусственных, технических и естественных живых систем?

Какие проблемы существуют при взаимодействии искусственных, технических и естественных систем?

Все эти особенности исследований полностью соответствуют тенденциям зарубежной науки.

С одной стороны, очевидны перспективные достижения в области искусственного интеллекта. Разработана, например, когнитивная вопросно-ответная система поддержки принятия решений IBM Watson для анализа медицинских карт пациентов и помощи врачам в принятии клинических решений [6]. Уже применяются версии персональных голосовых помощников (Siri и Cortana), ориентированные на предугадывание потребностей пользователя [7]. При желании им разрешается доступ к личным данным, таким как электронная почта, адресная книга, история поисков в Сети и т.п. Google готовит «умный транспорт». Цифровые помощники – это лишь зримая верхушка айсберга, которая доступна простому обывателю. В недрах IBM уже разработаны так называемые умные чипы, которые должны стать основой сенсорных сетей, имитирующих мозговую деятельность для последующих осознанных операций: логиче-

ских действий, необходимых вычислений и восприятия поступающих данных. Все это ориентировано на создание машин, которые будут по своим интеллектуальным способностям намного превосходить современного человека [8].

С другой стороны, такие успехи заставляют задуматься о возможной глобальной угрозе всему человечеству от технологических реализаций искусственного интеллекта при узкокорыстном или безответственном применении этих систем рядом разработчиков [7–12]. Ярким примером может послужить программа по созданию умных систем оружия, которые смогут без помощи человека оценивать степень угрозы от того или иного объекта и принимать самостоятельное решение о его уничтожении.

В Великобритании (University of Cambridge) предполагают создать новый Центр по изучению глобальных рисков, состоящий из ученых, философов и инженеров. Команда будет изучать развивающиеся технологии и определять, не опасно ли их влияние на человечество. Ключевым моментом изучения станет оценка создания искусственного интеллекта (ИИ) и анализ вероятностей того, что это чудесное изобретение не избавится от человечества, просто перестав в нем нуждаться [9].

Генеральный директор Tesla Motors и SpaceX Элон Маск предупреждает о потенциальной опасности электронного разума. Он считает, что люди попросту не понимают, насколько быстро прогрессирует искусственный интеллект и какую угрозу он может таить в себе. «Теоретически искусственный интеллект может быть опаснее ядерного оружия», – заявил Элон Маск. Любопытно, что слова Маска прозвучали на фоне заключения партнерского договора между Google DeepMind и Оксфордским университетом, которые намерены сообща развивать технологии ИИ. Речь идет о средствах глубокого обучения для осмысления естественного языка и инструментах визуального распознавания. Подобные разработки позволят машинам понимать человеческую речь и воспринимать изображение реального мира так, как это делают люди [10]. В марте 2014 года Элон Маск совместно с Марком Цукербергом и Эштоном Кутчером вложил $40 млн. в компанию Vicarious FPC, занимающуюся разработкой искусственного интеллекта. Основатели проекта планируют скопировать области коры головного мозга, которые отвечают за сенсорное восприятие, мышление, моторику, речь, и преобразовать их в программный код [11]. Впрочем, основатель Tesla и SpaceX не говорит о том, что разработку интеллектуальных систем нужно полностью прекратить. По его мнению, должна быть обозначена некая черта, преступать которую не следует. Он передал $10 млн. волонтерской организации Future of Life Institute, деятельность которой направлена на «смягчение рисков, которые грозят человечеству в будущем». Эта некоммерческая организация, в частности, и занимается исследованием угроз, которые несет в себе искусственный интеллект [11].

О том, что искусственный интеллект представляет скрытую угрозу для человека, ранее говорил Стивен Хокинг, английский физик-теоретик и космолог. Потенциал искусственного интеллекта в теории поможет справиться с болезнями, нищетой и военными конфликтами. С другой стороны, электронный разум может стать последней разработкой в истории человечества, если не будут тщательно просчитаны все потенциальные риски и опасности [12].

Участникам нашей конференции, российским разработчикам в таких проблемах и угрозах, несомненно, также придется разбираться. Фактически, активно обсуждается прогнозируемая социальная угроза, а реальные вызовы глобализации, в ходе которой часть земной «элиты» проводит конкретные действия по утилизации большей части населения Земли ради сохранения выделенной группы («золотой миллиард»), не замечаются. И дело, по-видимому, не в технологиях ИИ, а в понимании угроз ныне существующей «толпо-элитарной» политики управления в социуме. Может быть, надежда избежать трагедий состоит в переходе к социальным отношениям, в которых возможно создание реальных условий для реализации генетического потенциала каждого человека? Анализ истории формирования сложившейся ныне на Земле ситуации, условия и механизм такого перехода представлены в работах «Концепции общественной безопасности», которые авторский коллектив (ВП СССР) издает последние 25 лет (см., например, [3–4]). Кстати, обосновываемые ими схемы управления полностью соответствуют известному нам опыту по конструированию систем распознавания и, несомненно, будут интересны разработчиками элементов симулятора живых систем.

Отметим, что интерес ряда известных нижегородских физиков к изучению и обсуждению процессов познания, конечно же, оказал влияние на замысел организаторов конференции. Многим хорошо известен выдающийся представитель нижегородской радиофизики Михаил Адольфович Миллер (1924–2004). В 80–90-х годах он обратил внимание на существование трех «подмышлений» различного назначения и действия: а) «последовательное, логическое (иногда говорят алгебраическое) мышление»; б) «параллельное, образное (иногда говорят геометрическое)»; в) «подсознательное, ассоциативное подмышление, внешне кажущееся спонтанным, хаотизированным», интуитивное (см. [13, с. 8]). Способность Михаила Адольфовича вдумчиво воспринимать Природу и выносить на обсуждения важные исследовательские проблемы проявилась, например, в формулировке «вопросов к вопросам», с которыми в лекции «Размышления о размышлениях, или Раздумья про раздумья» он обращался к молодежной аудитории в 1990 году. Эти вопросы, кажется, обращены именно к участникам нашей конференции с ожиданием от нас изложения своих взглядов, версий ответов и дискуссий на эту тему.

«Итак, серия вопросов к вопросам.

Вопрос 1. Присмотритесь к своим склонностям и оцените свою принадлежность к какой-либо категории мыслителей... Кстати, люди с равноглавенствующими полушариями называются двоякоправыми (амбидекстрами), с таким

же успехом их можно было бы считать двояколевыми. А как называют людей с равномерно развитыми тремя подмышлениями, я не знаю, скорее всего никак. (И есть ли они вообще?)

Вопрос 2. А что творится в животном мире, на какой стадии эволюции возникла специализация мышления и входило ли это в замысел Создателя?

Вопрос 3. Кто есть кто в истории человечества? Обладатели каких мыслительных свойств оказали наибольшее влияние на развитие цивилизации (ее культуры, науки, политики и т. п.)?

Вопрос 4. Существует ли приверженность «лево-, право-, двояко-, троякомыслящих» людей к каким-либо профессиям? И не является ли известное противопоставление физиков (подразумевается небось – левополушарников) и лириков (подразумевается небось – правополушарников) всего лишь результатом поэтического небрежения к знанию? Кстати, а к какой категории относятся, по-вашему, так называемые люди быстрого счета?

Вопрос 5. Как развивается мышление по мере взросления детей? Не повторяет ли оно в сжатом времени исторические этапы развития мыслительных способностей «человека разумного»? И что чего первичнее – образность, логичность или интуитивность?

Вопрос 6. Насколько серьезны разнохарактерности мужчин и женщин? Имеет ли под собой аргументированное обоснование различие между так называемой мужской и женской логикой?

Вопрос 7. Как взаимодействуют между собой разно- и однотипно мыслящие люди? Какими свойствами обладают объединенные сообщества, составленные из таких людей? Какие дружеские семейные соединения, какие коллективы, народы, страны более жизненны, устойчивы, продуктивны и т. п.? И что представляет собой общественное сознание и подсознание?

Вопрос 8. Какую роль играют все эти «корки и подкорки» в нашем познании мира сего? Не является ли строго логическое (условно будем говорить – левополушарное) «обоснование природы» несколько навязчивым? Ведь человек состоит из тех же частиц и полей, что и мир вокруг; значит, речь идет о самопознании природы, то есть о познании ее самой собой с помощью ее же естественных средств и свойств? Здесь мы впервые встречаемся с понятием самосогласованности познания» (см. [13, с. 10–11]).

Задавая эти вопросы слушателям, Михаил Адольфович, наверняка, предполагал, как отвечать на них. А участники нашей конференции готовы сформулировать свои ответы? Из просмотра присланных в этот сборник материалов возникает ощущение, что такие ответы могут быть представлены в виде формализованных схем и на инженерном языке...

Дорогие участники конференции! Мы действительно уже выработали понятный нам язык для реалистичного обсуждения признаков, определяющих архитектуру мозговой обработки сигналов, процессы осознанного и бессознательного, механизмы интуиции, отличия рационального и иррационального у отдельных субъектов и в социальных системах, возможные угрозы при разработках искусственных интеллектуальных систем. А как на принятие решений влияет иерархия (а иногда и вариативность) нравственных и этических норм в изучаемых нами видах деятельности? Готовы ли мы согласовать в обсуждениях наши взгляды на будущие перспективы и угрозы проводимых разработок? Для обсуждения этих и иных вопросов планируется проведение «круглых столов» по следующим тематикам:

1. Модели адаптивных процессов и режимов осознания сенсорных сигналов в когнитивных системах;
2. Мировоззренческие и гуманитарные аспекты когнитивной науки;
3. Инструментальные средства исследования и регистрации параметров динамики функционального состояния живых и технических систем распознавания.

Использованные источники

1. Мозг, познание, разум : введение в когнитивные нейронауки : в 2 ч. / под ред. Б. Баарса, Н. Гейдж ; пер. с англ. под ред. проф. В.В. Шульговского. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 544 с. (Лучший зарубежный учебник).
2. Сайт конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». URL: http://www.nd-cogsci.iapras.ru/2009/ ; http://www.nd-cogsci.iapras.ru/2011/ ; http://www.nd-cogsci.iapras.ru/2013/.
3. Основы социологии : 4 т. / ВП СССР. СПб., 2010. URL: http://kob.su/kobbooks/osnovy-sotsiologii .
4. Об имитационно-провокационной деятельности / ВП СССР. СПб., 2001. URL: http://dotu.ru/files/20010324_Imitac_prov.pdf .
5. *Уилбер К.* Интегральная психология. Сознание, Дух, Психология, Терапия. 2004.
6. Когнитивная система IBM Watson – искусственный интеллект в борьбе с онкологией. URL: http://professionali.ru/Soobschestva/biznes-klub/kognitivnaja-sistema-ibm-watson-/.
7. Угроза искусственного интеллекта. URL: http://zhitanska.com/content/ugroza-iskusstvennogo-intellekta ; https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Cortana ; http://mbdevice.ru/11329-golosovye-pomoshhniki-cortana-i-siri-kto-luchshe/.
8. Искусственный интеллект опасен или нет для человечества? URL: http://www.prorobot.ru/06/ii-opasen-dlya-chelovechestva.php.
9. Учёные оценивают опасность развития искусственного интеллекта. URL: http://zitata.org/uchyonye-ocenivayut-opasnost-razvitiya-iskusstvennogo-intellekta/1327.html.
10. Опасность искусственного интеллекта. 27.10.2014. URL: http://www.vsedela.ru/index.php?topic=1778.0 ; www.3dnews.ru.
11. Элон Маск инвестировал $10 млн. в исследования по безопасности искусственного интеллекта. 15 января 2015. Режим доступа: http:// siliconrus.com/2015/01/musk-fights-ai/.
12. Стивен Хокинг: опасные возможности искусственного интеллекта. URL: http://www.objectiv-x.ru/sekretnye-issledovaniya/ stiven_hoking_opasnie_vozmozhnosti_iskusstvennogo_intellekta.html.
13. *Миллер М.А.* Лекции по физике... и не только. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2014. 140 с.

Желаем всем нам успеха!

В.Г. Яхно, Т.В. Романова, С.Б. Парин

Дискурс как социальная деятельность

Л.А. Аверкина

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

В последнее время чрезвычайно актуальными стали исследования языка в плане его взаимодействия с культурой. Языковая картина мира, как известно, выражает концептуальную картину мира средствами языка. Особое значение в рамках межкультурного общения имеет изучение категории комического при взаимодействии разных языковых культур. Умение декодировать и адекватно реагировать на тексты с элементами комического в процессе социальной деятельности является необходимым навыком, который играет важную роль в интеграции вербальной и чувственно-образной систем человека, а также составляет один из ключевых моментов категоризации языка, мышления и восприятия.

Перевод – это не только замена языка, но и функциональная замена элементов культуры [1, 2]. Такая замена не может быть полной, поскольку требование «перевод должен читаться как оригинал» едва ли выполнимо, так как оно подразумевает полную адаптацию текста к нормам другой культуры. В полной мере это касается перевода *прецедентных* текстов, которые представляют собой особый стереотипный образно-ассоциативный комплекс, значимый для определенного социума и регулярно актуализирующийся в речи представителей этого социума [3. С. 49].

Одним из ярких представителей прецедентных текстов является *анекдот.* В дискурсе анекдота отражается национальная картина мира, обыгрывается прецедентная ситуация и присутствуют прецедентные персонажи, представляющие собой мифологизированные этнические типажи, за которыми в массовом сознании закреплены характерные образы, ментальные стереотипы, специфические реакции и комические стандарты поведения, воспринимаемые адекватно исключительно в пределах речевой культуры, в которой создан данный анекдот.

При переводе следует учитывать, что специфики тематической организации комического в русской и немецкой культурах отличаются друг от друга.

Немецкая смеховая культура репрезентирована в большом количестве комических дискурсов с разной коннотативной окраской и функциональной направленностью, что указывает на повышенный интерес немцев к категории комического и опровергает сложившиеся стереотипы. Описание семантического поля комического помогает воссоздать реальные ситуации, что дает основание для рассмотрения данных элементов культуры как фреймов в рамках определенного дискурса, а именно: обиходно-9, Spott, Spaß) и игрового (розыгрыш – Flachs, Gaudi, Jux, Scherz, Spaß, Schabernack, Ulk).

Тип текста *Witz* является одним из самых ярких представителей текстов малого формата. В русском языке немецкому понятию *Witz* соответствует понятие *бытовой анекдот;* он построен на смысловом сдвиге, семантическом контрасте, которые обеспечивают внутреннюю конфликтность текста, необходимую для динамики его восприятия. Следует выделить два принципиально разных типа немецких бытовых анекдотов: *Situationswitz и Sprachwitz/Wortwitz (ситуативный и языковой анекдоты)*, каждый из которых требует к себе особого подхода при переводе.

Ситуативные анекдоты (Situationswitz) – это анекдоты, соль которых заключается в самом предмете или действии; объект насмешки – ситуация, сложившиеся обстоятельства, люди с их недостатками, их окружение. При переводе этого типа анекдотов непонимание юмора как следствие недостаточной компетенции в межкультурном общении можно разделить на несколько видов: 1) непонимание бытового юмора, связанное с отсутствием аналогичных реалий в своей культуре; 2) непонимание тех или иных принятых этикетных норм; 3) непонимание глубинных ценностей соответствующей культуры.

Языковые анекдоты (Wortwitz, Sprachwitz) – это анекдоты, основанные на игре слов, их соль заключается в отдельных словоформах и основана на языковых явлениях, таких как полисемия, омонимия, эвфемизмы, курьезные этимологические значения, скороговорки и т. д. При передаче игры слов, лежащей в основе этого типа анекдота, переводчик сталкивается с большими трудностями.

Проблемы перевода ситуативных анекдотов (Situationswitz)

Ситуативные анекдоты работают с комическими ситуациями, непредвиденными реакциями персонажей, со всевозможными табу, с нарушениями логики и серьезности, с вызывающими смех конфликтами происходящего и морали, нравов и приличий и т. д. Реализация соли предусматривает в таких анекдотах определенную свободу в выборе языковых средств. Некоторые из анекдотов этого типа требуют от слушателя определенного социального, политического, культурного или конфессионального знания, например:

Ein Dresdner kommt zum Sicherheitsdienst. «Ich möchte melden, dass mein Papagei entflogen ist». Missbilligend sieht ihn der Beamte an. «Was geht uns das an? Hier ist nicht das Fundbüro, sondern der Staatssicherheitsdienst». «Eben, eben», sagt der Mann seufzend. «Ich möchte Ihnen nur sagen, dass ich die politischen Ansichten meines Papageis nicht teile».

Житель Дрездена приходит в отдел службы безопасности. «Я хотел бы сообщить, что улетел мой попугай». Служащий смотрит на него подозрительно и спрашивает: «И что? Здесь не стол находок, а государственная служба безопасности». – «Я знаю, знаю, – вздохнув, отвечает мужчина. – Я только хотел вам сказать, что не разделяю политические взгляды моего попугая».

Перевод этого анекдота сделать довольно легко, но для полного понимания шутки представителями другой культуры и другой генерации необходимо дать небольшой комментарий: «Действие анекдота происходит в бывшей ГДР. Служба безопасности ГДР Штази (Staatssicherheit) преследовала всех, кто высказывался против СЕПГ (ведущая партия ГДР). Хозяин попугая, по всей видимости, критикующий действительность в ГДР, испугался, что его попугай повторит все то, что хозяин думает о политическом строе и жизни в стране».

Снабдив текст следующего анекдота комментарием, можно также снять непонимание юмора, основанное на незнании реалий:

Ein Autofahrer sagt zu einem anderen: «Ich hab mir eine Duden gekauft!» Darauf fragt der andere: «Und, hast du ihn schon eingebaut?»

Один автолюбитель говорит другому: «Я купил себе Duden!» Второй спрашивает его: «И что, ты его уже установил в машине?»

Для представителей нашей культуры анекдот не понятен. Это смешная ситуация для носителей немецкого языка. Два друга: один образованный, а другой нет. Второй не знает, что такое Duden. Для понимания этого анекдота русскими получателями информации необходим комментарий: «Duden» – это справочник по немецкому языку, а не автодеталь.

Обычно вызывают улыбку анекдоты, связанные с различными стереотипами по поводу профессий. В Германии, например, врачи – люди, жадные до денег, полицейские – ограниченные люди, служащие – ленивые, ремесленники – ненадежные.

Однако в культуре каждой страны с определенной профессией связаны свои конкретные стереотипы. И эти стереотипы часто не совпадают со стереотипами других культур. Так, следующий анекдот не вполне вписывается в представление русских о служащих:

Ein Beamter bekommt Besuch in seinem Büro. Der Besucher sagt: «Sie haben aber viele Fliegen hier!» Der Beamte antwortet: «Ja, genau 217!»

Посетитель приходит в офис служащего и удивляется: «Ой, сколько же у вас здесь мух!» Служащий отвечает ему: «Да, ровно 217!»

Для полного понимания этого анекдота необходимо дать комментарий: «В Германии существует мнение, что служащие очень хорошо зарабатывают, но на работе ничего не делают; они очень ленивые и поэтому часто становятся объектами различных шуток.

Проблемы перевода языковых анекдотов (Sprachwitz)

Комический эффект *языковой шутки (Sprachwitz)* определяется особым использованием языкового материала конкретного языка. Уже во время экспозиции текста анекдота с игрой слов перед коммуникантом открываются два уровня значений. Его внимание намеренно привлечено к первому семантическому значению, чаще всего общепринятому и употребительному значению. Второе семантическое значение появляется в последний, решающий момент, в так называемой соли анекдота. Здесь происходит неожиданное раскрытие и смещение смысла второго уровня значения. Если адресату это значение известно, то комический механизм приводится в действие.

Проанализируем перевод анекдотов с игрой слов на разных языковых уровнях и попробуем установить, функционируют ли данные механизмы и в другой языковой системе, в частности в русском языке, а также возможен ли перенос соответствующего текста анекдота в другую культуру.

Одной из самых трудно передаваемых является игра слов на орфографическом уровне:

*Wenn das Drama zu **gelehrt** ist, dann ist das Theater **geleert**.*

Если драма слишком заумная, тогда театр пуст.

В данном случае передать игру слов на русский язык невозможно. Поэтому при переводе мы вынуждены передать только смысл анекдота и дать к нему небольшой комментарий: *gelehrt* – заумный, поучительный (о пьесе); *geleert* – пустой (о зале).

Свои особенности имеет перевод анекдотов с фразеологизмами, устойчивыми оборотами. Так, например, перевод следующего анекдота можно считать успешным благодаря отходу от стереотипного понимания устойчивого оборота, приданию ему иного смысла:

*«Nach einigen Stunden Fahrt **tut mir** regelmässig **der Kopf weh**.» Der Sozius: «**Mir das Gegenteil**!»*

*«После нескольких часов езды у меня начинает **болеть голова**». Пассажир на заднем сиденье мотоцикла: «**А у меня совсем наоборот**! **Противоположная** часть тела!»*

Однако, рассматривая анекдоты этого типа с позиции идеоэтнической и универсальной значимости, можно обнаружить, что некоторые из них могут быть поняты только в контексте того языка, на котором они были созданы, и утратить свой смысл при попытках перевода на другие языки:

*Eine ernährungsbewusste Patientin fragt ihren Arzt: «Sind Fische **gesund**, Herr Doktor?» – «Ich glaube schon, bei mir war jedenfalls noch keiner in Behandlung.»*

*Одна весьма ответственно относящаяся к своему питанию пациентка спрашивает своего врача: «Рыба **здорова**, г-н доктор?» – «Думаю – да, по крайней мере, мне еще ни одну не приходилось лечить».*

Здесь также используется игра слов. По-немецки дословно *«Рыба **здорова**, господин доктор?»* Имеется в виду: является ли рыба здоровой пищей?

К группе «труднопереводимой» игры слов относятся анекдоты, в основе построения которых действуют следующие языковые механизмы: обыгрывание полисемичных лексем, неоднозначно понимаемых синтаксических конструкций, фразеологических оборотов; использование окказионализмов, приемов «народной этимологии», как, например, в следующем контексте:

*«Kennst Du den Unterschied zwischen Beamten und Fröschen?» – «Da gibt's keinen Unterschied. Beide sitzen rum, **blasen sich auf** und warten auf die **Mücken**».*

В данном анекдоте общее между лягушками и служащими выражается через полисемичные глагол *sich blasen* и существительное *Mücke.* В разговорной речи глагол *blasen – надувать (шар, щеки и т. п.)* – используется с возвратным местоимением *sich* в отношении к человеку, который преувеличивает представление о себе, чтобы поразить других своим значением. Существительное *Mücke* также полисемично. В единственном числе оно употребляется как нормированные лексемы *комар, мошка;* во мн. числе *Mücken* – разговорное слово *деньги*. В переводе на русский язык игра слов невоспроизводима, так как многозначные слова, обыгрываемые в немецком контексте, не имеют соответствующих эквивалентов в русском языке. Тем не менее анекдот можно перевести, сохранив содержание:

*Какая разница между служащими и лягушками?» – «Никакой. В то время как лягушки **ждут с надутыми щеками** комаров, служащие **сидят с надутыми щеками**, делая важный вид, и ждут своих денег».*

Для перевода прецедентных текстов (анекдотов) необходимо владеть различными видами переводческих трансформаций и руководствоваться основополагающими понятиями переводоведения – «адекватность» и «эквивалентность».

Процесс перевода прецедентных текстов, а именно немецких бытовых анекдотов, является сложным, поэтому переводчик должен выработать определенную переводческую стратегию. Перед переводом следует проанализировать текст, определить, к какому типу анекдотов он относится. Если анекдот является *ситуативным*, необходимо определить тематику, соотнести тему анекдота с аналогичной темой в русской культуре и при выявлении этнонациональных различий постараться их компенсировать при помощи лингвострановедческих комментариев. Если анекдот основан *на игре слов*, необходимо определить языковой уровень, на котором основана языковая игра (фонетический, лексический, морфологический, синтаксический), затем выполнить перевод при помощи определенных переводческих трансформаций. Часто возможна такая ситуация, что перевод может быть либо эквивалентным, либо адекватным. В такой ситуации переводчик решает, чем он может пожертвовать. Это напрямую зависит от цели и объекта коммуникативной ситуации.

Литература

1. *Халеева И.И.* Интеркультура – третье измерение межкультурного взаимодействия? // Актуальные проблемы межкультурной коммуникации. М. : МГЛУ, 1999. С. 5–15.

2. *Швейцер А.Д.* Перевод как акт межкультурной коммуникации // Актуальные проблемы межкультурной коммуникации. М. : МГЛУ, 1999. С. 180–187.

3. *Телия В.Н.* Русская фразеология. Семантические, прагматические и лингвокультурные аспекты. М. : Языки русской культуры, 1966. 241 с.

Оценка согласованности гетерохронных процессов дифференциации различных составляющих структуры знания

И.О. Александров, Н.Е. Максимова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт психологии РАН (Москва)

Структура знания (СЗ) в определенной предметной области фиксирует все множество информационных моделей взаимодействий носителя компетенции с данной предметной областью. Информационные модели взаимодействий фиксируются как компоненты СЗ, представленные группами нейронов, специализированных относительно конкретного акта поведения, реализующего цикл взаимодействия [1]. Компоненты СЗ находятся друг с другом в отношениях различного типа, которые определяют порядок их актуализации, связывают их в устойчиво воспроизводящиеся последовательности, обеспечивают повторные актуализации компонентов, определяют постоянную совместную актуализацию компонентов или запрещают ее. Отношения компонентов СЗ реализуются как взаимодействия между ними, фиксируются как информационные модели в суборганизации компонентов и поэтому могут воспроизводиться и обеспечивать закономерную динамику состава наборов актуализированных компонентов СЗ при решении конкретных задач в предметной области индивидом, носителем компетенции [2].

В исследованиях СЗ, фиксирующей компетенцию в стратегической антагонистической игре двух партнеров с полной информацией и нулевой суммой, а также структуры опыта у животных, обучавшихся сложному пищедобывательному поведению, установлено, что в формировании структуры особую роль играют процессы дифференциации трех типов [3].

Предковая форма для формирования СЗ как целостной организации, компоненты которой фиксируют множество информационных моделей взаимодействия индивида как члена диады с предметной областью, это популяция преспециализированных нейронов, продуктов неонейрогенеза, сопоставимых с нейронами первичного ассортимента [1, 4, 7]. Дифференциация-I – процесс порождения протокомпонентов из популяции преспециализированных нейронов, инициирующийся при вхождении в новую предметную область. Компоненты СЗ, представленные группами специализированных нейронов, образуются как продукт дифференциации-II, из протокомпонентов. Группа нейронов, имеющих общую специализацию относительно определенного цикла взаимодействия с предметной областью, носитель информационной модели этого взаимодействия, проходит дифференциацию-III – процесс образования суборганизации компонента СЗ. Продукт дифференциации этого типа – формирование у различных подгрупп нейронов, образующих компонент СЗ, дополнительных специализаций, которые фиксируют особый род информационных моделей, обеспечивающих взаимодействия между компонентами. В многочисленных дифференциациях третьего типа формируется сложная суборганизация компонента, содержащая множество моделей, обеспечивающих его многообразные взаимодействия с другими компонентами.

Порождение СЗ в процессах трех типов дифференциации не может быть описано как последовательность этапов. Можно предположить, что это эволюционный гетерохронный процесс системогенеза, в котором ветвящиеся траектории формирования протокомпонентов, компонентов СЗ и суборганизации компонентов должны быть согласованы как для дифференциаций одного и того же типа, так и для дифференциаций различных типов, как на кратких интервалах времени, так и на всем протяжении формирования компетенции. Для проверки этого предположения необходимо (1) определить порядок прохождения компонентами СЗ различных вариантов дифференциации-III и (2) оценить степень согласования всех вариантов дифференциации составляющих СЗ на протяжении формирования компетенции.

Методика. Анализировали количественные описания СЗ в стратегической игре двух партнеров с полной информацией и нулевой суммой (крестики-нолики на поле 15×15), построенные по алгоритмам, описанным в [1, гл. 7], для 465 участников исследования (244 женщины, 221 мужчина; характеристики распределения возраста: *min* = 6,5 лет, *quart* I = 16, *med* = 19 лет, *quart* III = 27,5 лет, *max* = 85 лет). Описания СЗ каждого испытуемого строили для 300 актов игры (совершенных в нескольких играх – от 5 до 70). В анализ включены характеристики процесса порождения составляющих СЗ, формирующихся в трех типах дифференциации: 1) протокомпонентов, 2) компонентов СЗ, 3) суборганизации компонентов СЗ, которая обеспечивает взаимодействия различного типа между компонентами. Для идентификации различных типов взаимодействий использовали логико-алгебраическую аксиоматику отношений [6]. О типах отношений компонентов СЗ и эмпирических свойствах соответствующих им взаимодействий см. [1, 3]. Заметим, что в данном сообщении описание отношений уточнено. Взаимодействие между компонентами, дифференцировавшимися из одного протокомпонента, по свойствам рефлексивности, симметричности и транзитивности характеризуется как отношение эквивалентности (*EQV*). Постоянство совместной актуализации компонентов СЗ обеспечивает антирефлексивное, симметричное и транзитивное отношение *AND*. Отношение *XOR* (исключительное *ИЛИ*), антирефлексивное, симметричное и нетранзитивное,

накладывает запрет на совместную актуализацию компонентов. Отношение *IOR* (неисключительное *ИЛИ*), антирефлексивное, несимметричное и нетранзитивное, допускает необязательную совместную актуализацию компонентов. Последовательность актуализации компонентов определяет нерефлексивное, несимметричное, нетранзитивное отношение следования (отношение нестрогого порядка, *A1*). Устойчиво воспроизводящиеся последовательности, т. е. стратегии, определяются отношениями строгого порядка (*B1*), антитранзитивными, антирефлексивными, антисимметричными. Отношение *B2*, рефлексивное, симметричное, антитранзитивное, обеспечивает повторные актуализации компонентов, «петли».

Для оценки согласованности процессов формирования протокомпонентов, компонентов СЗ и отношений различного вида между компонентами строили функции кросскорреляции (ФКК) между кривыми, отображающими эти процессы. Для того чтобы повысить вес периодических составляющих в кривых, отображающих формирование компонентов и взаимодействий между ними, устраняли линейную составляющую нарастания их количества. Для этого применяли процедуру линейного регрессионного анализа. ФКК строили со сдвигом от одного до 100 актов игры. Скольжение такого окна по эпохе анализа 300 актов игры позволяет рассматривать значения ФКК в диапазоне от –100 до +100 актов от нулевого смещения. Расчеты выполнены в пакете SPSS 11.2. Статистические гипотезы H_0 отвергали при $p \leq 0{,}05$.

Результаты и их обсуждение. Для введения разнообразных вариантов дифференциации-III, в которых формируется суборганизация компонентов СЗ, обеспечивающая взаимодействия между ними, в единый контекст онтогенеза структуры знания, использованы логико-алгебраические свойства отношений. В качестве основы для определения порядка принято проверенное в эмпирическом исследовании предположение о том, что наиболее ранний по времени формирования тип отношений – «эквивалентность» связывает группу компонентов, дифференцировавшихся из одного протокомпонента [3]. Изменение свойств отношения эквивалентности – рефлексивности, симметричности и транзитивности, могут вести только к сужению степеней свободы взаимодействия компонентов – к *не*рефлексивности, *не*симметричности, *не*транзитивности и далее к наиболее строгим и избирательным отношениям – *анти*рефлексивным, *анти*симметричным, *анти*транзитивным, например к отношению строгого порядка. Для семи типов отношений, связывающих компоненты СЗ, расположенных по порядку минимального снижения степеней свободы, построена дендрограмма с тремя ветвями (рис. 1), общий корень которых – отношение *EQV*. Одна из ветвей содержит отношения *AND, XOR* и *IOR*, относящиеся к группе синхронических отношений, определяющих состав наборов одновременно актуализирующихся компонентов. Другая ветвь содержит диахронические отношения *A1* и *B1* (см. [1]). Особая ветвь содержит отношение *B2*. Анализ построенной схемы показывает, что каталог выявленных отношений между компонентами может быть незавершенным, поскольку при соблюдении правила минимального изменения свойств в выделенных траекториях логические позиции для нескольких типов отношений определены, но не заполнены.

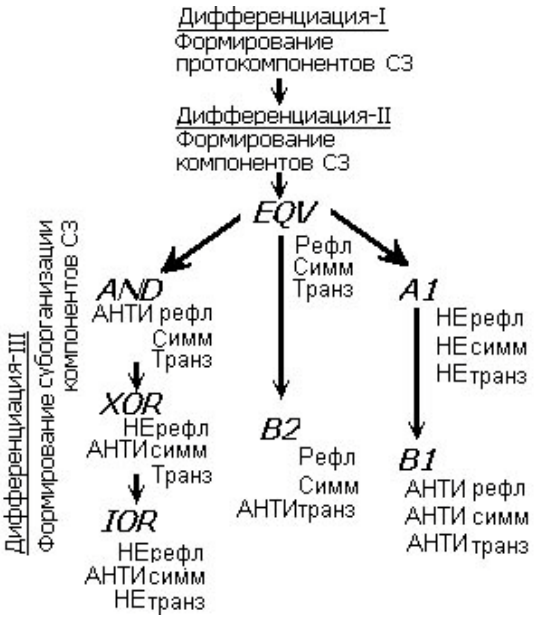


Рис. 1. Схема процесса дифференциации составляющих структуры знания. Показан порядок формирования отношений между компонентами СЗ, как различных вариантов дифференциации-III. Обозначения отношений: *EQV* (эквивалентность), *AND* (логическое «*И*»), *XOR* (исключительное «*ИЛИ*»), *IOR* (неисключительное «*ИЛИ*»), *A1* (отношение нестрогого порядка), *B1* (отношение строгого порядка), *B2* (отношение, образующее петли). Обозначения свойств отношений: «Рефл» – рефлексивность, «Симм» – симметричность, «Транз» – транзитивность; префиксы «НЕ~», «АНТИ~»

Поскольку порождение протокомпонентов и компонентов СЗ не прекращается на всем протяжении формирования компетенции, прохождение всех трех дифференциаций разными протокомпонентами (от порождения до формирования дифференцированной организации дочерних компонентов) перекрывается во времени. События дифференциации-III, обеспечивающие возможность компонента вступать с другими компонентами во взаимодействия различных типов, протекают у одного и того же компонента СЗ по трем траекториям одновременно (см. рис. 1). Даже по отношению к определенному дифференцирующемуся компоненту эти процессы гетерохронны. Поскольку установлено, что каждая конкретная модель взаимодействия между компонентами формируется синхронно на паре взаимодействующих компонентов [1], все стадии этих гетерохронных процессов должны быть согласованы.

Проанализированы 72 ФКК, что составляет полный перебор сочетаний кривых, отображающих формирование составляющих СЗ в процессах дифференциации (см. рис. 1). Форма ФКК варьи-

ровала в весьма широких пределах: с максимумом положительной или отрицательной корреляции при нулевом сдвиге с симметричным убыванием коэффициентов с увеличением сдвига (ФКК 2 и 5 на рис. 2), или без выраженных пиковых значений с максимумами/минимумами, смещенными относительно нулевого сдвига и асимметричными трендами при сдвиге разной направленности (см. рис. 5). Поскольку зона неотличимости коэффициентов корреляции от нуля узка, а тренд их изменения в этой зоне сохраняется, можно рассматривать ФКК на всей эпохе анализа, включая и диапазон 95% недостоверности. Положительные значения ФКК указывают на синергию сопоставляемых процессов, отрицательные – на реципрокность, величина сдвига между экстремумами – на отсроченный характер связи между процессами.

На рис. 2 показано семейство ФКК, построенное для кривой формирования отношения *XOR* с кривыми формирования продуктов трех типов дифференциации. Связь формирования отношения *XOR* (дифференциация-III) с процессами дифференциации-I и II (формированием протокомпонентов и компонентов СЗ) реципрокна, причем выраженность этих соотношений в нулевом сдвиге достигает значений –0,294 и –0,491, и симметрично снижается к границам эпохи анализа (рис. 2, ФКК 1 и 2).

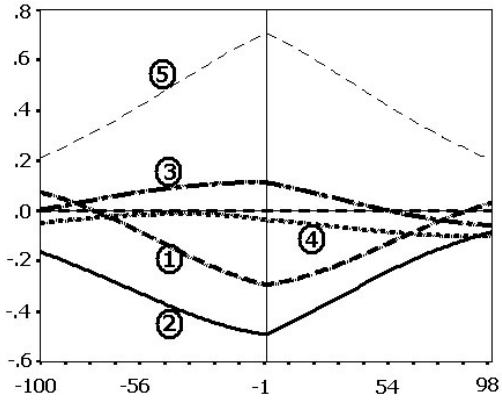


Рис. 2. Функции кросскорреляции кривой формирования отношения *XOR* с кривыми формирования протокомпонентов (*1*), компонентов СЗ (*2*), отношений *EQV* (*3*), *AND* (*4*) и *IOR* (*5*). По оси абсцисс – сдвиг, по оси ординат – значения ФКК. Горизонтальные линии в области нуля – 95% интервал неотличимости коэффициентов корреляции от нуля

Соотношение процесса формирования отношения *XOR* с порождением отношений *EQV*, наиболее раннего продукта дифференциации-III, и *AND*, также расположенного ближе к корню древа дифференциаций, чем *XOR* (см. рис. 1), иное. Эти функции невелики по амплитуде (абсолютные величины коэффициентов не превышают 0,115) и асимметричны – переходят в отрицательные величин в зоне положительных сдвигов (см. рис. 2, ФКК 3 и 4). ФКК для *XOR* и *IOR* (рис. 2, ФКК 5) симметрична, с максимальным положительным коэффициентом корреляции (0,709) в позиции с нулевым сдвигом. Характеристики этой кривой в основных деталях сходны с ФКК между процессами порождения протокомпонентов (дифференциация-I) и компонентов СЗ (дифференциация-II), достигающей в максимуме значения 0,848, также близких друг к другу по положению на древе дифференциаций (см. рис. 1).

Форма ФКК, характерная для дифференциаций, непосредственно следующих друг за другом на дендрограмме (см. ФКК 5 на рис. 2), воспроизводится для отношений *EQV* и нестрогого порядка *A1* (см. их положение на древе, рис. 1); эта функция показана на рис. 3 (сплошная линия).

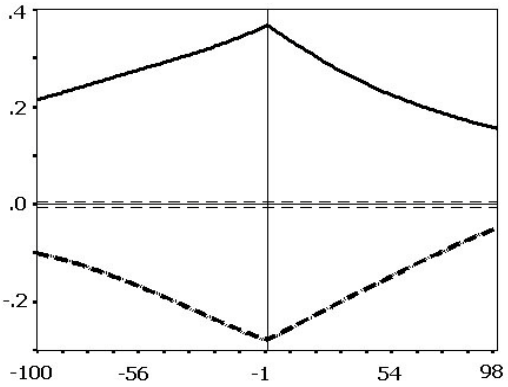


Рис. 3. Функции кросскорреляции для кривых формирования отношений нестрогого порядка, следования *A1* (сплошная линия) и строгого порядка, образующим стратегии *B1* (штриховая), относительно кривой формирования отношения *EQV*. Обозначения как на рис. 2

ФКК для дифференциаций, отделенных друг от друга на дендрограмме одной вершиной, порождающих отношения *EQV* и строгого порядка *B1* (рис. 3, штриховая линия), обладает выраженным сходством с ФКК между процессами, отдаленными на древе дифференциаций (см., например, ФКК *1* и *2* на рис. 2).

Эти результаты показывают, что дифференциации, непосредственно следующие друг за другом на дендрограмме, связанные логически, находятся в синергических отношениях. По-видимому, степень синергии снижается, если во времени между ними реализуются другие дифференциационные события, при этом синергия может сменяться реципрокными отношениями. Важно, что в форме этих ФКК выражен градиент снижения как синергии, так и реципрокности, при этом они охватывают всю эпоху анализа.

В двух случаях отмечено, что формы ФКК для процессов дифференциации, непосредственно следующих друг за другом на дендрограмме, сходны с ФКК соотношения дифференциаций, отдаленных друг от друга на древе (на рис. 4, см. *1* и *2*). Это может означать, что описание процессов дифференциации в двух ветвях дендрограммы (рис. 1, средняя и правая ветви) неполно. Возможно, что между дифференциациями, порождающими отношение *EQV* и *B2*, а также в интервале между порождением отношения *A1* и *B1*, развертываются еще не выявленные варианты дифференциаций.

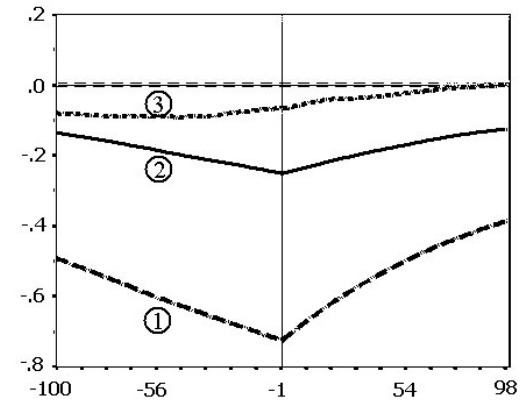


Рис. 4. Функции кросскорреляции между процессами формирования отношения *B1* относительно *A1* (*1*), отношения *B2* относительно *EQV* (*2*), отношения *EQV* относительно дифференциации компонентов СЗ (*3*). Обозначения как на рис. 2

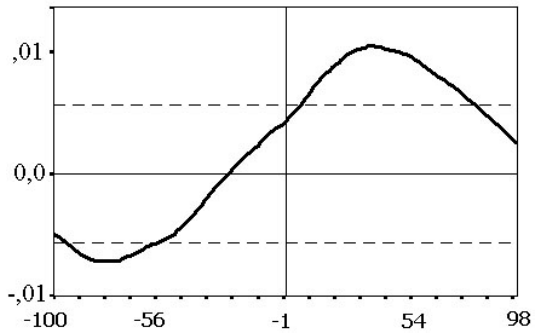


Рис. 5. Функция кросскорреляции между процессами формирования отношения *IOR* и *B2*. Обозначения как на рис. 2

Необычная форма ФКК, соотносящая порождение компонентов СЗ и отношение *EQV* (см. рис. 3, 4), без выраженного максимума, асимметричная, градуально нисходящая в зоне положительных сдвигов. В этой форме ФКК проявляется низкий и прогрессивно снижающийся уровень связи между процессами дифференциаций I и II. Это может объясняться принципиальным различием процессов дифференциации, порождающих компонентный состав СЗ и образующих суборганизацию компонентов. В процессах дифференциации-I и II предковые формы не сохраняются, в то время как в многочисленных преобразованиях дифференциации-III (обогащения субструктуры компонента СЗ моделями различных типов взаимодействий между компонентами) компонент сохраняет свою специфику как носитель информационной модели взаимодействия с предметной областью [3].

Для формы ФКК, связывающих процессы дифференциации-III, относящиеся к разным ветвям дендрограммы (см. рис. 1), характерна низкая амплитуда, выраженная асимметрия и ограниченные зоны значимых коэффициентов корреляции (см. рис 5).

Эти особенности ФКК указывают на невысокий уровень связи процессов формирования синхронических и диахронических отношений, а также на то, что образование синхронических отношений опережает формирование диахронических отношений. Это временное расхождение было выявлено в работе [5].

Выводы

1. Упорядоченные отношения между компонентами СЗ на основании их логико-алгебраических свойств образуют древо, корень которого представляет отношение *EQV*, три ветви древа соответствуют порождению синхронических (*AND, XOR, IOR*), диахронических отношений, (связывающих компоненты СЗ в последовательности *A1*, *B1*, *B2*) и отношений, обеспечивающих повторную актуализацию компонентов СЗ.

2. Анализ функций кросскорреляции показывает, что согласованность между процессами дифференциации, в которых формируются компоненты СЗ и отношения между ними, соответствует положению этих процессов на древе, описывающем последовательность и гетерохронию их дифференциаций; различные формы согласования этих процессов реализуются на всем протяжении формирования СЗ.

Работа выполнена при поддержке РГНФ, проект № 14-06-00155а.

Литература

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

2. *Александров И.О., Максимова Н.Е.* Закономерности формирования нового компонента структуры индивидуального знания // Психол. журн. 2003. Т. 24. № 6. С. 55–76.

3. *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.

4. *Александров Ю.И.* Системогенез и смерть нейронов // Нейрохимия. 2004, Т. 21. № 1. С. 5–14.

5. *Максимова Н.Е., Александров И.О., Тихомирова И.В., Филиппова Е.В.* Типология интуитивного-рационального и формирование структуры индивидуального знания // Психол. журн. 2001. Т. 22, №1. С. 43–60.

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

7. *Edelmen G.M.* Neural Darwinism: The theory of neuronal group selection. N.Y. : Oxford University Press, 1989.

О ценной информации в задачах усвоения данных наблюдений

А.К. Алексеев

РКК «Энергия», г. Королев; МФТИ, г. Долгопрудный Моск. обл.

Термин «информация» один из наиболее популярных в современном обществе и используется в необъятном количестве контекстов. Наиболее часто используемое определение количества информации Шеннона [1] ориентировано исключительно на проблемы передачи информации без связи с каким-либо содержанием. Однако как в научных кругах, так и на бытовом уровне широко используются некоторые интуитивные понятия информации, связанные с “рецептами”, “инструкциями”, “смыслом”, “знанием” и его ценностью и т. д. Хорошее изложение этой тематики можно найти, например, в [2, 3]. Ниже в качестве некоторого аналога этих понятий мы будем использовать термин “ценная информация”, трактуя его как знание того, какое воздействие на управляющие параметры выбрать, чтобы с известной точностью достигнуть некоторой цели при данном состоянии системы. На первый взгляд, в современной ситуации попытки формализации такого понятия представляются априорно бесперспективными. Тем не менее в нескольких распространенных классах обратных задач соответствующий формализм существует достаточно давно, и представляется, что трудности связаны только с его интерпретацией. В частности это касается задач вариационного усвоения данных наблюдений [4] и их ключевого инструмента – сопряженных (adjoint) уравнений [5].

Сопряженные уравнения используются для решения широчайшего круга практических задач, включая многие обратные задачи и задачи апостериорной оценки погрешности, соответствующая библиография содержит тысячи работ. Однако их природа на интуитивном уровне абсолютно непонятна. С математической точки зрения в одних случаях они получаются из тождества Лагранжа для скалярного произведения, в других – из условия стационарности некоторого лагранжиана, в третьих – из функции Грина, что, вообще говоря, не указывает на наличие какой-либо общей природы. Тем не менее при выводе из абсолютно разных предпосылок уравнения получаются идентичными. В прикладных дисциплинах в настоящее время возобладал сугубо прагматичный подход, в котором все внимание обращено на методы расчета сопряженных параметров вообще без обсуждения их природы. Однако представляется очень странным, что объект, используемый стандартным образом в широчайшем классе приложений, не имеет единой (строго говоря, вообще никакой) физической интерпретации. Вследствие этого, регулярно появляются работы, предлагающие некоторую трактовку «физического смысла сопряженных уравнений», например [6, 7]. Предлагаемая работа также стимулирована поиском места сопряженных уравнений и параметров в общенаучной системе знаний.

На раннем этапе исследований один из основоположников (Г.И. Марчук) сопряженные параметры обозначал как «функцию ценности информации» [5]. Смысл этого понятия достаточно расплывчат и в настоящее время оно вышло из употребления. Тем не менее идея придать сопряженным параметрам смысл некоторой функции информации исключительно перспективна и нуждается лишь в некоторых уточнениях, которые относительно легко сделать на примере одного из классов обратных задач – задач усвоения данных [4]. Эти задачи посвящены определению вектора управляющих параметров u_j некоторой системы (чаще всего, атмосферы) по наблюдениям f_i^{obs} (давление, температура, компоненты скорости) при наличии ковариационной матрицы погрешности наблюдений W_{ij}^{-1}. Они сводятся к решению вариационной обратной задачи с целевым функционалом вида

$$\varepsilon(u) = (A_{ij}u_j - f_i^{obs})W_{ik}(A_{kj}u_j - f_k^{obs})/2, \quad (1)$$

где A – оператор задачи. Этот функционал имеет смысл невязки расчета и измерения, нормированной на погрешность измерения. Его градиент имеет вид

$$\nabla\varepsilon = A^*W(Au - f^{obs}). \quad (2)$$

Шаг ньютоновской итерации, основанный на том, что в точке минимума $\nabla\varepsilon = 0$, дает решение вида

$$u = (A^*WA)^{-1}A^*Wf^{obs}, \quad (3)$$

которое формально полностью соответствует результатам статистической регуляризации обратных задач [8, 9] и статистической теории оценивания [10]. Здесь $A^*WA = F$ – информационная матрица Фишера, $(A^*WA)^{-1}$ – ковариационная матрица погрешности решения, член A^*Wf^{obs} в [10] обозначен как вклад, информант. Минимум функционала $\varepsilon(f)$ соответствует максимуму плотности вероятности в статистическом подходе [8, 9, 10]. В большинстве задач усвоения данных оператор A задан неявно с помощью системы частных дифференциальных уравнений (ЧДУ) и A^*Wf^{obs} в явном виде не известен. К счастью, существует развитая техника определения $\nabla\varepsilon$ с помощью решения сопряженных уравнений [5]. Поэтому на практике иногда используются ньютоновские итерации вида

$$\Delta u = u - u_0 = -(A^*WA)^{-1}A^*W(Au_0 - f^{obs}) \quad (4)$$

или, много чаще, градиентные методы, неявно

использующие некоторую примитивную аппроксимацию матрицы Фишера и решающие задачу итерациями.

Таким образом, в рассмотренном классе задач «ценная информация» как знание того, какое воздействие на управляющие параметры выбрать для достижения цели и с какой точностью цель будет достигнута, имеет векторную

$$\Delta u = (A^* W A)^{-1} \nabla \varepsilon \qquad (5)$$

и тензорную

$$(A^* W A)^{-1} \qquad (6)$$

составляющие (в ряде работ, например [11], матрица Фишера рассматривается как метрический тензор). Векторная компонента – координаты цели в пространстве управляющих параметров u, тензорная компонента – некий «эллипсоид рассеивания», задающий неопределенность достижения цели, – обратная информационная матрица Фишера.

Векторная часть ценной информации Δu связана с градиентом целевого функционала $\nabla \varepsilon$ линейным преобразованием. В этом смысле они эквивалентны, и ниже мы будем основную часть внимания уделять $\nabla \varepsilon$, так как уравнения в терминах расстояния до цели Δu на данный момент неизвестны, а на практике используются сопряженные уравнения, позволяющие рассчитывать именно $\nabla \varepsilon$. Обычно градиент целевого функционала выражается через комбинацию физических и сопряженных параметров или даже просто через сопряженные параметры. В качестве примера рассмотрим модельную задачу определения $u(t,x)$ по наблюдениям $f^{obs}(t,x)$ в системе, заданной уравнением конвективного переноса

$$\frac{\partial f}{\partial t} + a\frac{\partial f}{\partial x} + u(t,x) = 0 . \qquad (7)$$

Целевой функционал (для простоты записанный без учета погрешности) имеет вид

$$\varepsilon(u) = \int (f(t,x) - f^{obs}(t,x))^2 / 2 dx dt . \qquad (8)$$

В данном случае на решении сопряженной задачи

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + a\frac{\partial \psi}{\partial x} + (f - f^{obs}) = 0 \qquad (9)$$

(здесь эволюция идет в обратном направлении по времени) градиент целевого функционала просто равен сопряженной функции

$$\nabla \varepsilon = \psi(t,x) \qquad (10).$$

Таким образом, при постановке обратных задач для систем ЧДУ можно считать, что сопряженные уравнения описывают перенос векторной компоненты “ценной” информации. При этом источниковый член

$$f - f^{obs} \qquad (11)$$

соответствует невязке расчета и наблюдения и описывает образование информации.

Тензорная компонента ценной информации может быть рассчитана с помощью уравнений информационной динамики типа Эйнштейна [11], но этот подход создает исключительные по своей сложности вычислительные проблемы. Однако вместо информационной матрицы Фишера $F = A^* W A$ можно использовать гессиан невязки

$$H_{jm} = \partial^2 \varepsilon / \partial u_j \partial u_m , \qquad (12)$$

который в окрестности оптимального решения аппроксимирует матрицу Фишера. Расчет матрицы Фишера с использованием гессиана существенно проще, чем по методу [11] и может быть выполнен с помощью решения сопряженных уравнений второго порядка [12]. Существуют также возможности маломерного представления гессиана [9]. В задачах умеренной размерности расчет оператора $A_{ij} = \partial f_i / \partial u_j$ можно осуществить с помощью прямого численного дифференцирования.

Информационная матрица Фишера имеет в случае нормального распределения следующие скалярные инварианты [13]:

информация Фишера

$$I_F = trace(F) \qquad (13)$$

информация Больцмана – Шеннона

$$I_{Sh} = 1/2 \log_2 \det(F) \qquad (14)$$

В работе [13] эти инварианты использованы для оценки количества информации, содержащейся в измерениях. Эти два скалярных инварианта матрицы Фишера широко используются в теоретических и прикладных задачах. Информация Шеннона является основой современной теории информации [1]. Информация Фишера в ряде работ используется в качестве эвристического инструмента для выведения уравнений физики [14]. В уравнения Шредингера в форме Маделунга информация Фишера входит непосредственно в форме источника [15].

Сопоставление векторной компоненты ценной информации с градиентом целевого функционала позволяет определить некоторые интуитивные понятия. Цели можно сопоставить точку минимума целевого функционала в пространстве управляющих параметров. Градиенту, который указывает, куда двигаться для достижения цели, можно соотнести понятия инструкции, рецепта. Зависимость градиента от начального состояния системы u_0 соответствует зависимости информации от «предварительной осведомленности» [3]. Ценность данной информации можно определить как максимальное изменение целевого функционала при движении вдоль градиента. Если мы знаем точный градиент $\nabla \varepsilon_{true}$, то мы можем судить о векторе информации Z по скалярному произведению $(Z \nabla \varepsilon_{true})$. Это позволяет определить степень неточности информации $\|Z - \nabla \varepsilon_{true}\|$, нулевую информацию $(Z \nabla \varepsilon) = 0$, наличие информации с отрицательной ценностью (дезинформации) $(Z \nabla \varepsilon) < 0$, не уменьшающей, а увеличивающей функционал.

Как показано выше, градиент целевого функционала связан с сопряженной функцией (или даже тождествен ей), соответственно сопряженные параметры имеют смысл векторной компоненты ценной информации, а сопряженные уравнения описывают ее перенос. Соответственно, трудности, связанные с поиском физического смысла сопряженных параметров, вызваны не столько проблемами трактовки собственно сопряженных уравнений и их решений, сколько отсутствием общепринятой количественной формулировки широко используемого на интуитивном уровне понятия информации.

Следует, вообще говоря, отметить, что сообщества исследователей, использующих сопряженные уравнения [5], информационную матрицу Фишера [11], статистическое решение обратных задач [8, 9], скалярные инварианты тензорной информации [1, 14] в основном не осознают наличия некоторой общей информационной основы.

Таким образом, представляет определенный интерес формализация интуитивных представлений об информации через понятие «ценной информации». Ее векторная часть соответствует градиенту целевого функционала в пространстве управляющих параметров и обладает многими свойствами интуитивных определений информации, таких как «полезная информация» [2], «ценность информации» [3]. Возникновение и перенос векторной части «ценной информации» описываются сопряженными уравнениями. Тензорная компонента «ценной информации» соответствует ковариационной матрице погрешности в точке цели и определяется информационной матрицей Фишера. Она описывается уравнениями информационной динамики типа Эйнштейна [11]. Информации Шеннона и Фишера являются скалярными инвариантами матрицы Фишера и для ряда задач могут служить для количественной оценки качества наблюдений.

Литература

1. *Shannon C.E.* A Mathematical Theory of Communication // The Bell System Technical Journal. 1948. V. 27. P. 379–423, 623–656.

2. *Бонгард М.М.* Проблема узнавания. М. : Мир, 1967. 319 с.

3. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. Динамическая теория информации М. : УРСС, 2004. 287 с.

4. *Le-Dimet F.X., Talagrand O.* Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations // Tellus. 1986. V. 38A. P. 97–110.

5. *Марчук Г.И.* Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М. : Наука, 1992. 336 с.

6. *Пупко В.Я., Зродников А.В., Лихачев Ю.И.* Метод сопряженных функций в инженерно-физических исследованиях. М. : Энергоатомиздат, 1984. 315 с.

7. *Wang Q., Gao J.-H.* The drag-adjoint field of a circular cylinder wake at Reynolds numbers 20, 100 and 500 URL, arXiv:1205.5516v4 6 Jul 2013.

8. *Теребиж В.Ю.* Введение в статистическую теорию обратных задач. М. : Физматлит. 2005. 375 с.

9. *Flath H.P., Wilcox L.C., Akcelik V., Hill J., van Bloemen Waanders B., Ghattas O.* Fast algorithms for Bayesian uncertainty quantification in large-scale linear inverse problems based on low-rank partial Hessian approximations // SIAM J. Sci. comput. 2011. V. 33(1). P. 407–432.

10. *Fisher R.A.* Theory of statistic estimation // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1925. V. 25. P. 700–725.

11. *Calmet X., Calmet J.* Dynamics of the Fisher information metric // Physical Review E. 2005. V. 71 (5). 056109.

12. *Alekseev A.K., Navon I.M.* On Estimation of Temperature Uncertainty Using the Second Order Adjoint Problem // Int. J. of Comput. Fluid Dynamics. 2002. V. 16 (2). P. 113–117.

13. *Singh K., Sandu A., Jardak M., Bowman K.W., Lee M.* A practical method to estimate information content in the context of 4D-Var data assimilation // SIAM/ASA Journal of Uncertainty Quantification. 2013 V. 1. P. 106–138.

14. *Frieden, B.R., Soffer B.H.* Lagrangians of physics and the game of Fisher-information transfer // Phys. Rev. E 1995. V. 52. P. 2274–2286.

15. *Reginatto M.* Hydrodynamical formulation of quantum mechanics, Kahler structure, and Fisher information. URL: arXiv:quant-ph/9909065v1 21 Sep 1999.

Методологические проблемы интеграции гуманитарных и естественно-научных подходов в изучении процессов мышления

В.А. Антонец[1,2], В.Г. Яхно[1]

[1]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
[2]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
(Национальный исследовательский университет)

Природа – сфинкс. И тем она верней
Своим искусом губит человека,
Что, может статься, никакой от века
Загадки нет и не было у ней.
Ф. Тютчев

Проблема не спрашивает,
какая у тебя специальность.
Убеждение авторов

Несмотря на то что попытки естественно-научного подхода к изучению процессов мышления, основанные на измерении и моделировании, насчитывают несколько десятилетий, приоритет в этой области отдается подходам гуманитарным. При всем уважении к достигнутым на этом пути результатам, многие из которых вызывают восхищение, нельзя не отметить и два принципиальных недостатка.

Во-первых, результаты, полученные гуманитарными науками, излагаются на неформализованном или слабо формализованном языке, что приводит к постоянным спорам о терминологии, и значительная часть работ нередко ничего кроме этого и не содержит. Проблема дополнительно обостряется, когда речь идет о переводе научных текстов на иностранный язык. Кроме того, поскольку каждый из языков эволюционирует, то по прошествии времени возникает еще и проблема внутриязыкового перевода.

Во-вторых, объем знаний постоянно нарастает, и для передачи их своим коллегам или студентам требуется столько времени, что его не хватает ни учителям, ни ученикам.

Вследствие этих обстоятельств объективность и широта распространения знаний падают, они начинают тяготеть к сектантским, а для науки и практики это почти то же самое, что этих знаний нет.

С точки зрения семиотики [1, 2], основную задачу которой определил еще в XVII веке Джон Локк: «рассмотреть природу знаков, которыми ум пользуется для понимания вещей или для передачи своего знания другим» [3], такая проблема «упаковки» знаний для передачи не является новой. В науках, называемых естественными, она решается путем перевода эмпирических данных из описательной (энциклопедической) формы в модели, излагаемые на знаковом или символьном уровне.

В качестве примера проникновения такого подхода и в биологические науки можно привести один из самых существенных научных результатов XX века в них – построение формальных моделей распространения электрических импульсов в нервных волокнах и их генерации в электрически активных клетках, например в клетках синусного узла сердца. С точки зрения компактности и устойчивости, а следовательно, быстроты и достоверности передачи знаний о работе нервного волокна результат получился потрясающим. Основное знание из старых книг [4–7] в сотни страниц стало умещаться в тонкие брошюры или параграфы в новых книгах [8]. Объемные, энциклопедически описанные экспериментальные данные, например [9], получили компактное описание. В новом представлении небольшим количеством формул описывались явления и эффекты, связанные с процессами генерации и распространения спайков, на которые раньше требовались целые главы. То, что раньше представлялось загадочно-сложным, стало объясняться просто и ясно. Факты стали ранжироваться не по яркости их проявления, а по фундаментальной значимости. Мало того, оказалось возможным благодаря управлению параметрами формальных моделей прогнозировать возможные режимы работы нерва, в том числе при взаимодействии с искусственными электронными устройствами. В нынешнее время это уже целая индустрия, позволяющая получать прагматические медицинские решения – некоторые функции передачи потоков нервных импульсов успешно выполняются электронными чипами.

Означает ли это, что эти модели полностью описывают нервное волокно? Конечно, нет! Например, они не описывают процессов восстановления баланса вне- и внутриволоконной концентрации электролитов. Работы по моделированию этих процессов ведутся, и очевидно, что рано или поздно закончатся успехом. Будет ли это означать, что тогда мы узнаем про работу нерва все? Конечно, нет. Останется еще много важных вопросов, например о трофике, генезе и развитии.

Другой замечательный пример, в некотором смысле зеркальный предыдущему, гуманизация компьютеров. До изобретения Стивом Джобсом графического интерфейса, знаки и символы (иконки, аватары, буквы и цифры) которого позволяют пользователю управлять решением значимой для него содержательной задачи, компьютер был игрушкой хакеров. Нужно было обладать большим объемом конвенционных знаний, чтобы суметь запрограммировать ЭВМ на решение содержательной задачи. Но как раз содержательными знаниями программисты, будучи носителями весьма сложных конвенционных знаний о правилах программирования, и не обладали. Для получения сколь-нибудь существенных результатов

необходимо было создавать дорогостоящие и не слишком эффективные консорциумы носителей содержательных знаний – экспертов и носителей конвенционных знаний – программистов. После некоторой притирки и обмена знаниями консорциумы становились способными выдавать значимые результаты. Однако из-за дороговизны процесса такое могли себе позволить только богатые заказчики, прежде всего военные для моделирования оружия (ядерных снарядов и бомб, ракет, самолетов и др.) и его работы, а также для управления оружием и войсками. Управленческая военная опция, как известно, породила Интернет.

Создание графического интерфейса в корне переменило ситуацию. Для пользователей преобразование содержательных знаний в компьютерные программы сильно облегчилось. Теперь доступ к компьютеру перестал требовать программистских знаний, и компьютер потенциально стал доступен огромному числу людей. Однако их интерес к компьютеру определялся и определяется исключительно важностью и качеством содержательных знаний, заложенных в программы-приложения. Именно эти предметные содержательные знания определяют аудиторию пользователей и тем самым создают фронт работ для программистов. И так как передача знаний – это главное, то в компаниях, производящих программное обеспечение, собственно программисты давным-давно перестали быть главными людьми. Главные – те, кто формирует опции и интерфейс пользователя, отражающие главные его нужды и необходимые для него операции. Когда вы создаете текст или презентацию, электронную таблицу или конструкторский чертеж, кликая иконки и виртуальные кнопки интерфейса или строки выпадающего меню, вы запускаете гигантское количество элементарных бинарных операций, значение которых не понимаете, если вы не программист. Но и те из них, кто программирует на языках высокого уровня, – тоже не понимают. Тем не менее колоссальный охват пользователей и скорость, с которой он произошел, говорят об исключительно удачном решении.

Однако пользователи тоже сильно отличаются друг от друга. Поэтому сильно отличаются и интерфейсы используемых ими программ. Скажем, системы CAD понятны конструкторам, но не понятны бухгалтерам. Зато конструкторы не знают платформы 1С и т.д. Словом, можно утверждать, что необходимость обладания профессиональными (конвенционными и содержательными) знаниями – это также «хакерский» порог входа в компьютерные технологии. По нынешним интерфейсам все более специализирующихся программных приложений виден существенный дефицит интуитивно понятных для неподготовленного пользователя аватаров и иконок.

Гений Стива Джобса заключался в том, что, может, и не формулируя это явно, он сделал следующий шаг. Сведя до минимума необходимый объем конвенционных знаний, он создал iPad, открывший совершенно неподготовленным «простым» людям доступ к статическим и движущимся изображениям, к звукам и к их передаче на другие компьютеры, в том числе и на iPad-ы и смартфоны. Это было, прежде всего, не техническое, а гуманитарное решение. Такие решения плохо защищаются как интеллектуальная собственность. Поэтому в считанные месяцы конкуренты воспроизвели его, и планшетные компьютеры (tablets) стремительно распространились по всему миру и охватили категории людей, обладающих малым объемом конвенционных знаний о передаче звуков и изображений. Теперь мы можем увидеть годовалого ребенка, чей возраст гарантирует малость объема конвенционных (модельных и символьных) знаний, который уверенно и, главное, с удовольствием играет с планшетным компьютером.

Две приведенные иллюстрации могут послужить разумным примером построения междисциплинарного интерфейса, который позволяет решить хотя и не все видимые проблемы, но значимую их часть. Это может позволить составить систематическое изложение и осуществить попытку установления соответствия между представлениями, понятиями, терминами и моделями обеих сторон при изложении имеющихся знаний. Полученные пересечения и станут теми знаниями, которые готовы к компактному формализованному изложению и устойчивой передаче во времени и в профессиональной среде.

Для анализа текущей ситуации будем характеризовать подходы к исследованию процессов мышления человека с помощью шкалы «гуманитарный – естественно-научный», полагая, что она хотя и не совпадает, но сильно коррелирует со шкалами «интегральный – локальный», «наблюдательный – экспериментальный», «качественный – количественный», «описательный – модельный».

Вряд ли кто возразит, что в неразрывном процессе «получение – прагматическое использование» научных знаний в области исследования мышления человека есть нужда как в видении общей перспективы (big picture), которое рождает новые задачи, так и в точном владении деталями, без которого эти задачи не решить. Это и наводит многих на мысль о существовании чего-то похожего на известное соотношение неопределенности: чем шире взгляд, тем меньше его острота и внимание к деталям, и понимание деталей. Модельный подход, присущий естественным наукам, всегда сосредоточен на деталях исследуемого объекта или процесса, и поэтому никогда не отражает их в целостном виде.

Известному физику Я.И. Френкелю, автору теории расширяющейся Вселенной, принадлежат слова: «Физик-теоретик… подобен художнику-карикатуристу, который должен воспроизвести оригинал не во всех деталях, подобно фотографическому аппарату, но упростить и схематизировать его…» (цитируется по [10]).

Однако все разумные люди понимают, что добиться узнавания оригинала в карикатуре удается лишь тогда, когда она схватывает его важнейшие черты. В этом смысле весь теоретический (читай,

модельный) аппарат точных наук представляет собой постоянно пополняющийся и редактируемый и уже довольно объемистый альбом карикатур Природы, в котором чрезвычайно компактно описаны ее известные свойства. И физики вполне осознают это (см., например, [11]). Когда мы употребляем физические термины, например «осциллятор», «волна», «электрон», «атом», «идеальный газ», «поле тяготения» и др., а теперь еще и «спайк», мы, если прилежно учились, видим и понимаем обоснованные модельные конструкции, которые стоят за этими терминами, а также диапазон условий, в которых эти конструкции хорошо соответствуют реальности.

С помощью этого замечательного конструктора мы можем составлять модели многих сложных явлений природы, а также проектировать новые объекты техники с прагматически важными для нас свойствами. В гуманитарных науках, например в филологических, похожую функцию выполняют цитаты из базовых произведений. По ним «свои» идентифицируют друг друга и ситуацию. Конечно, цитаты важны и по своему содержанию, но одновременно являются и сигнальным знаком.

Гуманитарный подход, несомненно, имеет преимущество в целостном видении проблемы и механизмов мышления. Основные современные представления о механизмах мышления человека развиты гуманитарными науками. Ими же выработана терминология, и им до последнего времени в основном принадлежала практика исследования мышления и других когнитивных функций. Однако ими же сформировано мнение, напоминающее этноцентрическую установку исключительности у многих народов и племен, которые считают настоящими людьми только себя [12], о том, что:

– мозг человека – самый сложный из известных объектов мироздания,

– сложность мозга и когнитивных процессов не позволяет строить их формальные модели.

Означает ли это, что попытки моделирования процессов мышления в стиле, присущем естественным наукам, прежде всего физике, исходно безнадежны и бесплодны, а по мнению некоторых исследователей, еще и вульгарны. Последние результаты показывают, что это далеко не так. Например, некоторыми компаниями, в частности и компанией Google, продемонстрированы возможности компьютерных сетей самообучаться распознаванию изображений, и это у них получается лучше, чем у человека! Сети сами вырабатывают алгоритмы распознавания. Изучение показывает, что в состав разработанных ими алгоритмов входит сопоставление конкретного распознаваемого объекта с базовыми обобщенными объектами, играющими роль категорий, которые были выработаны этими системами на основе «просмотра» обучающих изображений. Совсем как у человека, хотя известно, что и животные способны к категоризации объектов [13]. Важно отметить, что в данном случае моделировалась лишь архитектура нейронных сетей и элементы архитектуры мозга, чего оказалось достаточно, чтобы система делала то же самое, что умеет мозг.

В связи с этим можно полагать, что следует открыть и начать заполнять в альбоме физико-математических карикатур Природы раздел «когнитивные системы». Очевидно, что это не будет легкой работой. Авторам приходилось сталкиваться с тем, что при попытке объяснить свои формальные модели они сталкивались с настойчивым требованием толковать введенные понятия именно так, как это уже принято в исследуемой области. Например, при обсуждении модели принятия человеком решения в ходе транзакций обмена, в которой вводилось понятие «ценность», они слышали от психологов: «Что вы! Ценность – это совсем другое!» Фактически это означает, что психологи настаивали на завершенности формирования соответствующей онтологии, что совершенно исключено в любой развивающейся области науки. При обсуждении этих же работ с экономистами нередко можно услышать, что «термины и понятия, которые вы используете в работе (научной!) отсутствуют в нормативных и законодательных актах». Конечно, такая почва не способствует диалогу. С другой стороны, подходы представителей естественных наук к проблемам моделирования мышления и когнитивных функций часто бывают неоправданно упрощенными, а ожидания и притязания завышенными. Это вызывается той асимметрией в научной подготовке «гуманитариев» и «естественников», что последние имеют хотя бы базовый уровень гуманитарных знаний просто как члены социума, а «гуманитарии» чаще всего не владеют даже базовыми представлениями физики и математики. Поэтому «физики» хотя бы на каком-то, чаще всего недостаточном, уровне могут понять идеи «гуманитариев», а обратное встречается реже.

Преодоление рисков коммуникационных неудач предполагает наличие мотивации и доброй воли обеих сторон, направленных на обоюдное ознакомление с имеющимися в их распоряжении знаниями и подходами [14–16]. В докладе предполагается обсудить максимально, по нашим возможностям, гуманизированное описание некоторых наших моделей [17–19] и подборки моделей других авторов [20–24] с тем, чтобы начать эту работу.

Литература

1. Semiotics [Электронный ресурс] // WikipediA : The Free Encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Semiotics

2. ВикипедиЯ : свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/

3. *Локк Дж.* Опыт о человеческом разумении : книга 4. Сочинения : в 3 т. Т. 2. М. : Мысль, 1985. С. 199–200.

4. *Беритов И.С.* Общая физиология мышечной и нервной системы. 3-е изд. Т. 1. М., 1959.

5. *Уфлянд Ю.М.* Теория и практика хронаксиметрии. Л. : Гос. из-во мед. лит. 1941. 360 с.

6. *Уфлянд Ю.М.* Физиология двигательного аппарата человека. Л., 1965.

7. *Lapicque L.* L'excitabilité en fonction du temps. La chronaxie, sa signification et sa mesure. Paris : Presses universitaires de France, 1926. 371 p.

8. *Иваницкий Г.Р., Кринский В.И., Сельков Е.Е.* Математическая биофизика клетки. М. : Наука, 1978. 308 с.

9. *Гоффман Б., Крейнфилд П.* Электрофизиология сердца. М. : ИЛ, 1962. 389 с.

10. *Филиппов А.Т.* Многоликий солитон. М. : Наука, 1986. 224 с. (Библиотечка «Квант» ; вып. 48.).

11. *Добрушин Р.Л.* Гидродинамический предельный переход. Некоторые карикатуры. Взаимодействующие марковские процессы и их применение к математическому моделированию биологических систем. Пущино, 1982. С. 7–20.

12. *Дэйви М.* Эволюция войн. М. : Центрполиграф, 2009. 460 с. ISBN 978-5-9524-4070-8.

13. *Herrnstein R.J., Loveland D.H.* Complex visual concept in the pigeon // Science. 1964. V. 146. P. 549–551.

14. *Мустайоки А.* Почему общение на *лингва франка* удается так хорошо // Языки соседей: мосты или барьеры? : проблемы двуязычной коммуникации / отв. ред. Н.Б. Вахтин, С-Пб. : Изд-во Европ. ун-та в Санкт-Петербурге. 2011. С. 10–31.

15. *Mustajoki A.*, A speaker-oriented multidimensional approach to risks and causes of miscommunication, Language and Dialogue, 2012, №2, p. 216-243

16. *Мустайоки А.*, Причины коммуникативных неудач: попытка всеобщей теории, Русский язык за рубежом, 2011, № 4, p. 76-86

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

18. *Яхно В.Г.* Динамика нейроноподобных моделей и процессы «сознания» // Лекции по нейроинформатике. М. : МИФИ, 2006. VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2006». С. 88–111.

19. *Яхно В.Г.* Процессы самоорганизации в распределенных нейроноподобных системах. Примеры возможных применений // «Нейроинформатика-2001» : лекции по нейроинформатике. М. : МИФИ, 2001. С. 103–141.

20. *Осипов Г.С., Панов А.И., Чудова Н.В.* Управление поведением как функция сознания. 1. Картина мира и целеполагание // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 49.

21. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.* О роли понятий «образ» и «символ» в моделировании процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 5–21.

22. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Щепетов Д.С.* О подходе к моделированию процесса мышления с позиций динамической теории информации // Подходы к моделированию мышления / под ред. В.Г. Редько. М. : Ленанд, 2014. С. 29–88. (Синергетика от прошлого к будущему ; № 70) (Науки об искусственном ; № 13).

23. *Шумский С.А.* Язык и мозг : как человек понимает речь // Подходы к моделированию мышления / под ред. В.Г. Редько. М. : Ленанд, 2014. С. 89–118. (Синергетика от прошлого к будущему ; № 70) (Науки об искусственном ; № 13).

24. *Шумский С.А.* Реинжениринг архитектуры мозга: роль и взаимодействие основных подсистем // XVII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Нейроинформатика-2015» : лекции по нейроинформатике. М. : НИЯУ МИФИ, 2015. С. 13–46.

Фонетика речи: акустико-моторная динамическая система?

В.А. Антонец[1,2], К.Н. Алешин[2], А.А. Харитонов[2], А.А. Чевачин[2]

[1]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
[2]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
(Национальный исследовательский университет)

В известной работе С. Пинкера [1] содержится следующее утверждение: «Представления, размещенные в мозге, должны быть набором символов. Вспомним, что такое представление должно использовать символы для репрезентации логических отношений между ними». В качестве антитезиса, однако, можно привести высказывание С. Лэмба из его работы, посвященной изучению лингвистической системы отдельного индивидуума, содержится утверждение: «Человек производит сборку слова «здесь и сейчас», из чего следует, что внутренними являются не слова и морфемы, но средства продуцирования таких форм» [2]. Человек обладает двумя инструментами предъявления этих языковых форм – письмом и акустической речью. Представляется интересным выяснить, наследуют ли оба эти инструмента свойство лингвистической системы быть не хранилищем коллекции каллиграфических символов и фонетических единиц, а инструментом их продуцирования, и какого рода свидетельства возможно найти для исследования нейрокогнитивной лингвистической системы человека.

Акустическая речь представляет собой цепь последовательных фонетических актов, подкрепленных соответствующей артикуляцией. С физиологической точки зрения эти акты являются одновременно мышечными моторными актами, в этом смысле генерация звуков речи тождественна локомоции. Однако о локомоциях, включая удержание позы, начиная с известных работ [3], достоверно известно, что они являются исполняемой программой в случае не только осмысленных, но и непроизвольных движений. Эта программа использует имеющийся в центральной нервной системе внутренний интерпретатор потоков данных, поступающих от систем экстра- и интерорецепторов. Сопоставление исполняемой программой текущего положения тела с желаемым приводит к генерации эфферентных потоков и последующим мышечным моторным актам. Если внутренняя «модель тела» не соответствует реальности или если потоки афферентных данных интерпретируются неадекватно, то и двигательный акт становится неадекватным. Представляется естественным, что производство фонетических актов происходит примерно по такой же схеме, что и реализация локомоций, но афферентный поток данных поступает от слухового анализатора. Если при этом к звукам слышимой собственной речи человека подмешивается внешний звук, интерпретируемый им как собственный, то генерируемые управляющие эфферентные потоки неизбежно окажутся искаженными, что, соответственно, должно привести и к искажению речи. На рис. 1 изображена весьма распространённая схема, соответствующая такому представлению.

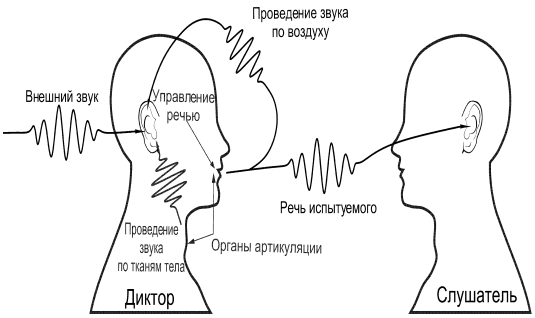


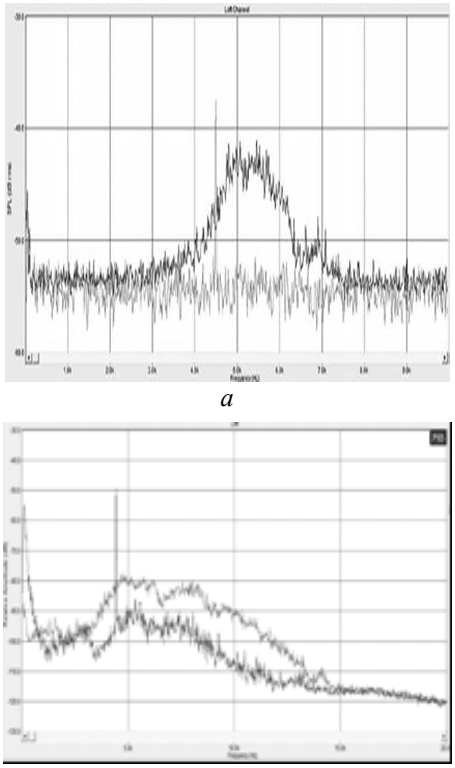
Рис. 1. Функциональная схема восприятия звука (речи) диктором и слушателем

Таким образом, деятельность слухоречевого аппарата можно интерпретировать как деятельность акустомоторной динамической системы (систем). Такая точка зрения весьма распространена (см., например, [4]). Следует обратить внимание, что в одном из последних обзорных трудов по фонетической акустике, принадлежащих одному из самых авторитетных специалистов [5], сама идея влияния (в том числе звукового) на фонетику даже не упоминается, впрочем, как и в других обзорах и учебниках (например, [6, 7]).

Во время исследования колебаний поверхностных мягких тканей тела человека, возбуждаемых акустическим полем в воздухе, было замечено, при достаточно высокой, но не оглушающей громкости тонального звука с частотой в окрестности 3 кГц персонал лаборатории начинал шепелявить. Для проведения экспертизы испытуемому (5 человек) в наушниках (закрытое акустическое оформление; диаметр мембраны 4,5 см; чувствительность 110 дБ; диапазон воспроизводимых частот 20 Гц – 20 кГц), предлагалось в течение нескольких секунд произносить в микрофон звук «с». На рис. 2 приведены соответствующие спектрограммы: сначала испытуемые должны были произносить звук «с» в обычной обстановке (сигнал в наушники не подавался), а затем при действии синусоидального сигнала с частотой 2–5 кГц (варьировалась) при уровне звукового давления (варьировался) 60–90 дБ (уровень 60 дБ соответствует громкой человеческой речи, уровень 90 дБ – крику).

Видно (рис. 2, *а*) что при действии внешнего звука уровень спектральных составляющих произносимого испытуемым звука падает и становится неразличимым на уровне шумов. Это значит, что испытуемый попросту перестает воспроизводить звук «с», хотя, судя по его мимике и по его собственному утверждению, он это делает. Сто-

ронний же наблюдатель воспринимает речь испытуемого как шепелявую.



а

б

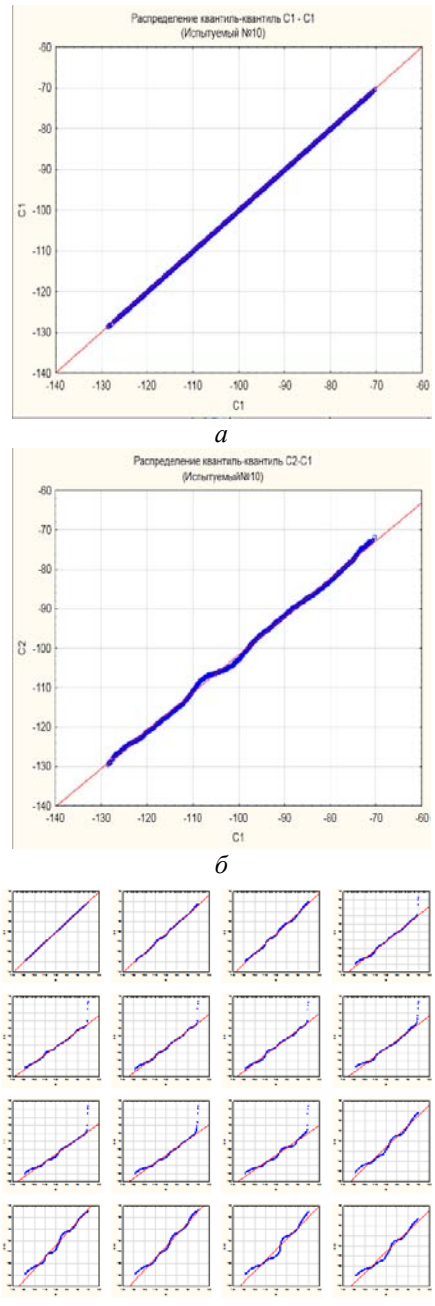
Рис. 2. Спектрограммы звука [с] в нормальных условиях (*а*) и при воздействии тонального звука (*б*)

Для оценки динамических особенностей эффекта испытуемым (15 человек) был предъявлен видеоряд, состоящий из слайдов с указанием конкретной буквы, в условные моменты времени сопровождавшихся тональным звуком с частотой 4,5 кГц и уровнем звукового давления 100 дБ (измерение производилось откалиброванным шумомером MS6700: динамический диапазон 30–130 дБ; погрешность измерений ±1,5дБ)) Последовательность слайдов состояла из четырех серий: отсутствие воздействия (3 слайда) – воздействие (5) – воздействие (3) – отсутствие воздействия (5). Момент появления слайда с буквой (всегда «с») служил командой для испытуемого к началу записи – он должен был произносить соответствующий звук до тех пор, пока слайд не сменится пустым (3 секунды), после чего предъявлялся следующий слайд с буквой и т. д. Серия №1 позволяла оценить вариации фонетических характеристик в обычных условиях. Для развития общего утомления между сериями №2 и №3 был предусмотрен 10-секундный интервал, в течение которого звуковое воздействие продолжалось, но без предъявления букв (демонстрировался пустой слайд). Серия №4 требовалась для оценки остаточного эффекта (инерционности). Представляется удобным оценить полученные результаты с помощью сопоставления некоторых статистических распределений.

Пусть задано $P(X)$ – распределение некоторой случайной величины X. Пусть также задан фиксированный параметр α, такой, что $0 < \alpha \leq 1$; тогда квантилем уровня α распределения $P(X)$ называется число x_α, такое, что:

$$P(X) \geq \alpha \text{ для } X \leq x_\alpha,\ P(X) \leq 1-\alpha \text{ для } X > x_\alpha. \quad (1)$$

В силу физиологических, психологических и прочих различий анализ необходимо проводить для каждого человека *индивидуально*. Если использовать в качестве базового распределения $P(X)$ совокупность отсчетов амплитудного спектра звука, произнесённого в нормальных условиях (C_1), то можно получить следующие характеристики (рис. 3) (если наблюдаемые значения попадают на прямую линию, то рассматриваемое распределение близко к базовому):



а

б

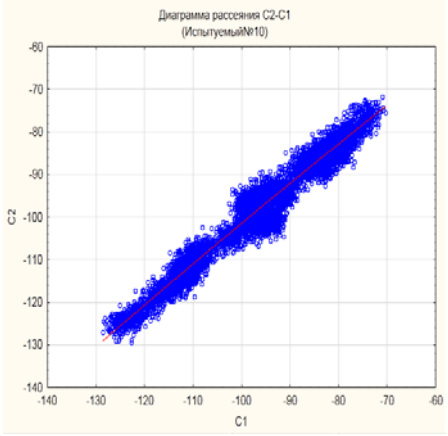
в

Рис. 3. Автораспределение кв.-кв. C_1/C_1 (*а*); распределение кв.-кв. C_2/C_1 – вариация характеристик речи в нормальных условиях (в качестве примера) (*б*); распределения кв.-кв. C_1/C_1, …, C_{16}/C_1 (последовательно) (*в*)

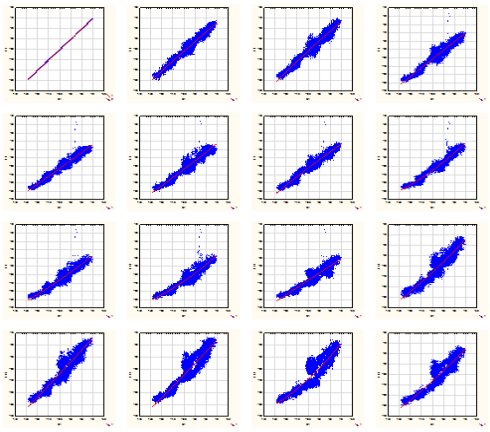
Другой наглядной формой представления статистических различий между распределениями являются диаграммы рассеяния (рис. 4); координаты каждой точки на диаграмме в декартовой системе координат равны значениям параметров соответствующих наблюдений. Если предполагается зависимость одного параметра от другого, то обычно значения независимого параметра откладываются по горизонтальной оси, а значения зависимого – по вертикальной. В нашем случае независимыми параметрами полагаются значения отсчетов амплитудного спектра сигнала речи в нормальных условиях, а зависимыми оказываются значения отсчетов на разных стадиях воздействия.

Положение (угол наклона) секущей диаграммы для разных серий, а также структурные особенности (увеличение разброса точек, появление петель) диаграмм позволяют судить о степени искажения вокализации на разных этапах воздействия. На приведенных диаграммах рассеяния (рис. 4, *б*) заметна тенденция к значительному «распылению» облака значащих точек в зависимости от текущего состояния.

По-видимому, приведенные данные согласуются с представлением о том, что элементарный фонетический акт является стереотипной программой, в которой заложено управление моторным актом, основанное на восприятии слуховым анализатором речевого акустического результата.



а

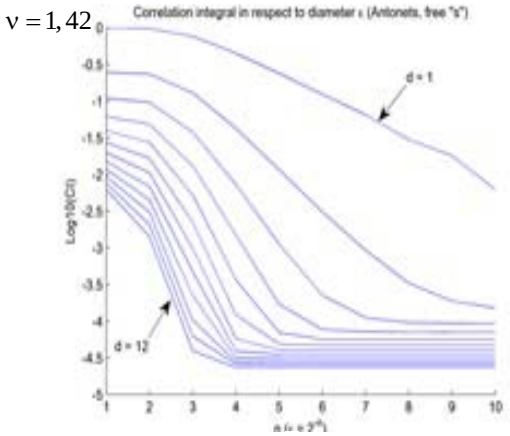


б

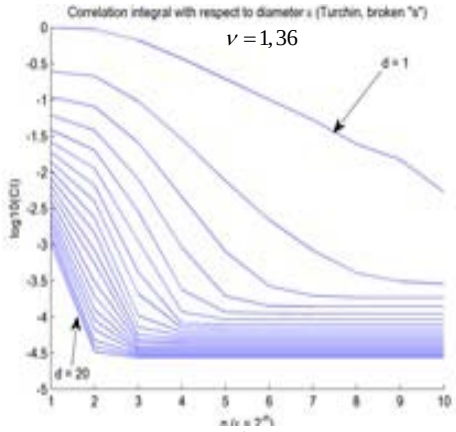
Рис. 4. Диаграммы рассеяния: *а* – C_2/C_1 – вариация характеристик речи в нормальных условиях (в качестве примера); *б* – C_1/C_1, …, C_{16}/C_1 (последовательно)

По всей видимости, разборчивую речь можно рассматривать как последовательную цепь исполнения стереотипных фонетических актов, каждому из которых соответствует своя собственная динамическая система с образом в виде аттрактора. Очевидно, что в каждом языке имеется свой оригинальный набор аттракторов, соответствующих элементарным фонетическим единицам, обеспечивающим разборчивую речь. Поэтому вполне возможно, что хорошо развитая в физических и математических науках техника анализа структуры и устойчивости динамических систем позволит глубже понять элементарные механизмы акустической речи и разработать методы влияния на нее.

Используя отсчеты временного ряда, на основе метода Паккарда – Такенса [8] возможно построить копии аттракторов в евклидовом пространстве R^d подходящей размерности $d \geq 2\nu + 1$ (d – натуральное число). Однако для практического применения метода в первую очередь требуется оценка размерности аттрактора. В предельном приближении, размерность аттрактора совпадает с так называемой корреляционной размерностью ν [9]. На рис. 5 изображены графики сходимости значения корреляционного интеграла [9]; значение корреляционной размерности ν определяется по области скейлинга – участку линейного наклона графика.



а



б

Рис. 5. Графики корреляционной размерности: *а* – звука [с] в отсутствие воздействия; *б* – звука [с], индуцированного звуковым воздействием

Данные соответствуют данным, полученным в результате обследования испытуемого *N* на стадиях (**3**–5–**3**–5) соответственно (естественная речь и сильное утомление).

Стоит отметить значительное изменение минимальной размерности вложения (d = 12 в первом случае и d = 18 во втором). Ниже приведена таблица вариаций корреляционной размерности (совместно с оценкой минимального пространства вложения) для некоторых испытуемых (6/15):

Номер испытуемого	Параметры испытуемого	
	C_1;(d)	C_{10};(d)
1	1.47(10)	1.31(19)
2	1.37(11)	1.22(20)
3	1.42(12)	1.36(18)
4	1.45(12)	1.3(20)
5	1.29(10)	1.08(19)
6	1.31(12)	1.2(19)

Указанные выше оценки размерности аттракторов представляют большую практическую ценность с точки зрения постановки задач моделирования (прямых задач). Так, например, анализируя данные испытуемого № 5, можно заметить, что реконструируемый аттрактор звука [с] в норме имеет размерность $\nu \approx 1{,}3$, и может быть вложен в пространство размерности 4:

$$d \geq 2 \cdot 1{,}3 + 1 = 3{,}6 \rightarrow 4,$$

т. е. данный аттрактор является образом системы, моделируемой системой ДУ 4-го порядка; в то же время реконструированный аттрактор в условиях сильного акустического утомления имеет размерность $\nu \approx 1{,}1$:

$$d \geq 2 \cdot 1{,}1 + 1 = 3{,}2 \rightarrow 3,$$

и, соответственно, с высокой степенью точности может представлять систему ДУ 3-го порядка.

Литература

1. *Pinker S.* The Language Instinct. N. Y. : Morrow, 1994.

2. *Лэмб С.М.* С какими данными работает нейрокогнитивная лингвистика. Компьютеры, мозг, познание. М. : Наука, 2008. С. 180–01.

3. *Гурфинкель В.С., Коц Я.М., Кринский В.И.*и др. О настройке перед движением // Модели структурно-функциональной организации некоторых биологических систем. М., 1966. С. 292–301.

4. *Deng L.* A dynamic, feature-based approach to the interface between phonology and phonetics for speech modeling and recognition," Speech Communication. 1998. V. 24, No. 4. P. 299–323.

5. *Baart J. L.G.* Field Manual Acoustic Phonetics. Dallas, SIL Ink., 2010. ISBN 13: 978-1556712326, ISBN 10:1556712324.

6. *Stevens K.N.* Acoustic phonetics. Cambridge, MA : The MIT Press, 1998.

7. *Harrington J.* Phonetic analisys of speech corpora. Oxford : Wiley-Blackwell, 2010.

8. *Packard N.H., Crutcheld J.P., Farmer J.D., Shaw R.S.* Geometry from a time series // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. P. 712–716.

9. *Макаренко Н.Г. //* V Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2003»: Лекции по нейроинформатике. Ч. 1. М. :МИФИ, 2003. (Научная сессия МИФИ-2003).

Билингвальный тест Струпа как способ отображения лингвистических функций мозга

А.В. Бахчина[1], М.С. Серова[1], Т.Н. Синеокова[2], Н.А. Буланов[3], С.А. Полевая[1,4]

[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2]Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова
[3]Высшая школа экономики, Н. Новгород
[4]Нижегородская государственная медицинская академия

Введение

Работа направлена на поиск физических отображений лингвистических функций мозга в реакциях на вербальные стимулы. Определена разница во времени принятия решений по отношению к вербальным стимулам на русском и английском языках в контексте билингвального теста Струпа у русскоязычных студентов с разным уровнем лингвистической компетентности.

В классическом варианте теста Струпа предлагается произнести название цвета в соответствии со смыслом или цветом букв слова, обозначающего цвет. Измеряется время принятия решений и количество ошибок в 4 контекстах:

- слово, обозначающее цвет, написано черными буквами и предъявляется на светлом фоне; целевая функция – назвать цвет в соответствии со смыслом слова;
- цвет букв и смысл слова эквивалентны; целевая функция – назвать цвет в соответствии со смыслом слова;
- цвет букв не соответствует смыслу слов; целевая функция – назвать цвет в соответствии со смыслом слова;
- цвет букв не соответствует смыслу слов; целевая функция – назвать цвет в соответствии с цветом букв.

В третьем и четвертом контекстах формируется рассогласование между информационными образами, активируемыми вербальным и цветовым зрительными стимулами. Такой когнитивный конфликт информационных образов проявляется в увеличении времени принятия решения – величины временного интервала между моментом предъявления стимула и ответом тестируемого. Благодаря контексту с когнитивным конфликтом удается получить объективное отображение разницы в активности вербального и цветового информационных образов [4, 5]. Если целевая функция связана с речевым отображением стимула, то доминирует вербальный образ [9]. При необходимости назвать цвет букв информационный процесс существенно усложняется, поскольку необходимо не просто прочитать, а требуется актуализировать в памяти слово, соответствующее цвету букв, и произнести его, подавляя программу чтения предъявляемого слова. Естественно, что для классического варианта теста Струпа замедление в большей степени выражено в четвертом контексте, когда задача включает называние цвета шрифта, а не смысла слова [10]. Это явление названо психологом Дж. Струпом – «эффект интерференции».

Влияние программы чтения на результаты теста полностью снимается при изменении целевой функции: вместо речевого отображения предлагается с помощью мыши или клавиатуры выбрать правильный из набора цветовых образцов. В этом случае проявляется «эффект обратной интерференции»: замедление в большей степени выражено в третьем контексте при выборе цветового образца по смыслу слова в условиях когнитивного конфликта [5]. Такой вариант теста удобен для реализации в виде компьютерной программы и в настоящее время активно используется для изучения когнитивных процессов в разнообразных аспектах [8].

Один из вариантов модификации компьютеризированного теста Струпа – это билингвальный тест, в котором слова предъявляются на родном и иностранном языке. Показано, что при использовании слов иностранного языка взаимодействие вербального и цветового стимулов остается, но в значительно менее выраженной степени по сравнению с родным языком [2, 7]. Влияние вербального стимула больше для слов из языка, который актуален и чаще используется в повседневной жизни на данный момент [1]. Если одинаково часто используются оба языка, то и влияние вербальных стимулов будет одинаковым [6].

Можно предположить, что разница в лингвистических функциях мозга, связанных с родным и иностранным языками, будет проявляться в степени выраженности эффекта обратной интерференции при когнитивном конфликте.

Методы

В исследовании приняли участие студенты ННГУ им. Н.И. Лобачевского, обучающиеся по специальности «психология», и студенты НГЛУ им. Н.А. Добролюбова, обучающиеся по языковым специальностям. Всего выборка испытуемых составила 39 человек (8 м., 31 ж.) от 18 до 26 лет.

На первом этапе оценивался уровень знания английского языка у участников по методике Placement test (http://oxfordklass.com/placement-test/). Каждому участнику предлагалось выбрать правильные ответы на 20 вопросов. Список вопросов включает 20 пунктов с тремя вариантами ответа: два пункта соответствовали уровню Elementary, три пункта – уровню Pre Intermediate, семь пунктов – уровню Intermediate, восемь пунктов – уровню Upper Intermediate. При анализе бланков с ответами испытуемых в первую очередь подсчитывалось количество правильных ответов на пункты

уровня Elementary, затем Pre Intermediate, затем Intermediate и Upper Intermediate.

На втором этапе проводился компьютеризированный тест Струпа. Измерялись время принятия решений и количество ошибок в 4 контекстах: 1-й контекст – слово, обозначающее цвет, написано черными буквами и предъявляется на светлом фоне; целевая функция – выбор цветового образца в соответствии со смыслом слова; 2-й контекст – цвет букв и смысл слова эквивалентны; целевая функция – выбор цветового образца в соответствии со смыслом слова; 3-й контекст – цвет букв не соответствует смыслу слов; целевая функция – выбор цветового образца в соответствии со смыслом слова; 4-й контекст – цвет букв не соответствует смыслу слов; целевая функция – выбор цветового образца в соответствии с цветом букв.

Использован тест Струпа, реализованный на многомодульной WEB-платформе Apway.ru. Отличительной особенностью применяемой модификации теста является возможность задавать названия цветов на различных языках или добавлять собственные варианты цвета для проведения экспериментов.

Эксперимент включал две серии измерений: со словами на русском и английском языках. В каждой серии измерений использовали 6 стимулов (слов и соответственно кнопок): желтый (yellow), красный (red), синий (blue), зеленый (green), коричневый (brown), фиолетовый (purple). В каждой задаче предъявлялось 12 слов (каждое слово предъявлялось дважды), сценарий последовательности предъявления слов был одинаковый в обеих сериях.

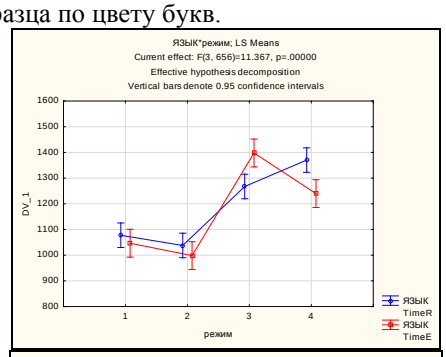
На третьем этапе осуществлялась статистическая обработка полученных результатов. Использовались: ANOVA – дисперсионный анализ с повторными измерениями, критерий Уилкоксона для связанных выборок, кластеризация – метод *k*-средних. Анализировались эффекты, связанные с индивидуальными особенностями, спецификой задачи в тесте Струпа, лингвистическим типом теста и уровнем языковой компетентности участников экспериментов.

Результаты и обсуждение

По уровню знания английского языка выборка испытуемых распределилась следующим образом: Elementary – 17, Pre Intermediate – 4, Intermediate – 3, Upper Intermediate – 15. Для анализа использовались только данные испытуемых с уровнями знания английского языка Elementary и Upper Intermediate. Важно отметить, что группа Elementary включала студентов, обучающихся только по специальности «психология», а группа Upper Intermediate включала 11 студентов, обучающихся по языковой специальности, и 4 студента – по специальности «психология».

Анализ влияния фактора языка на время реакции в тесте Струпа показал, что значимые эффекты проявляются только в группе Elementary ($F(1,68) = 6,85$, $p < 0,05$), а в группе Upper Intermediate отсутствуют ($F(1,65) = 1,19$, $p > 0,05$). При уровне Upper Intermediate среднее время реакции инвариантно к языку, на котором написано слово (рис. 1; табл. 1). Кроме того, представители группы Upper Intermediate быстрее, чем Elementary, решают 7 из 8 вариантов задач, предлагаемых в билингвальном тесте Струпа. Уровень языковой компетентности не проявляется только в четвертом контексте в задаче, не требующей извлечения цветового образа из семантики при поиске цветового образца по цвету букв.

а



б

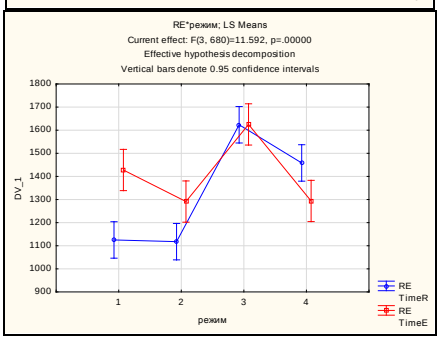


Рис. 1. Средние значения времени сложной сенсомоторной реакции выбора на русские и английские слова в тесте Струпа у двух групп испытуемых: *а* – с уровнем знания английского языка Upper Intermediate, *б* – Elementary. * – $p \leq 0.01$, критерий Уилкоксона

Таблица 1. Время реакции в билингвальном тесте Струпа

КОНТЕКСТ	elementary		up-intermediate	
	TR_рус (мс)	TR_англ (мс)	TR_рус (мс)	TR_англ (мс)
Выбор по слову, черно-белый вариант	1124.97±200.4	1427.77±754.1	1077.5±183.2	1046.6±177.5
Выбор по слову, семантика и цвет согласованы	1117.64±291.7	1291.20±593.3	1037.8±185.8	998.3±206.3
Выбор по слову, конфликт семантики и цвета	1623.62±842.4	1625.05±951.72	1267.4±358.8	1397.8±561.5
Выбор по цвету букв, конфликт семантики и цвета	1458.31±773.7	1293.727±412.1	1370.1±438.2	1239.7±334.5

В группе Elementary принятие решений по смыслу слова в контекстах без рассогласования происходит медленнее, если слово на английском языке. При когнитивном конфликте влияние языка на выбор по слову исчезает и проявляется эффект обратной интерференции: время между предъявлением стимула и выбором цветового образца достоверно больше, чем в других контекстах. При выборе цветового образца по цвету букв в контексте с когнитивным конфликтом слабое знание английского языка дает преимущество: если слово на английском языке, то время реакции меньше. Только в русскоязычном варианте теста у 12 % студентов группы проявляется эффект прямой

классической интерференции: вербальный образ тормозит принятие решения о выборе цветового образца по цвету букв при когнитивном конфликте.

В группе Upper Intermediate фактор языка не оказывает влияния на время принятия решений по смыслу слова в контекстах без рассогласования. При когнитивном конфликте фактор языка имеет большое значение и проявляется весьма неожиданным образом. При выборе цветового образца по смыслу слова время реакции для слов родного русского языка меньше, чем для английского; при выборе цветового образца по цвету букв соотношение времени реакции противоположно и быстрее принимается решение о цвете букв для английских слов. В англоязычном варианте теста доминирует эффект обратной интерференции, как и в группе Elementary. В русскоязычном варианте, в отличие от Elementary, проявляется прямая классическая интерференция как по средним значениям, так и у 38 % студентов: автоматические программы, связанные со словами на родном языке, тормозят выбор по цвету букв сильнее, чем слова на английском языке. Таким образом, влияние вербального стимула больше для слов родного языка, что полностью согласуется с результатами, полученными при исследовании немецких студентов, изучающих английский язык [1].

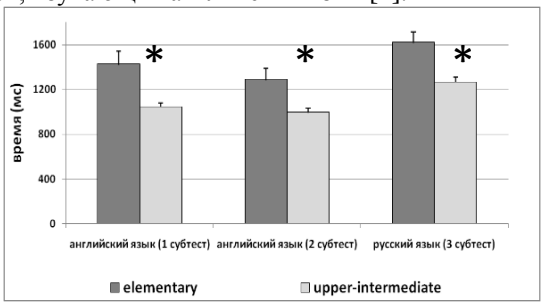


Рис. 2. Средние значения времени сложной сенсомоторной реакции выбора на русские и английские слова в тесте Струпа у двух кластеров испытуемых. * – $p \leq 0{,}01$, критерий Фишера

В результате кластерного анализа массива времен реакций в четырех контекстах теста Струпа выделено два кластера, которые 100 % специфичны и чувствительны к уровню английского языка испытуемых. Достоверные отличия (критерий Фишера, $p \leq 0{,}01$) в кластерах наблюдаются по показателям: время реакции в черно-белом варианте теста Струпа с английскими словами; время реакции при выборе цветового образца по слову на английском языке , окрашенного в соответствии со смыслом; время реакции при когнитивном конфликте для выбора по смыслу слова на русском языке (рис. 2). По всем трем показателям группа Upper Intermediate совершает выбор быстрее по сравнению с группой Elementary. Таким образом, представляется возможным использование билингвального варианта теста Струпа для определения уровня знания английского языка в шкале Elementary / Upper Intermediate. Для более точной оценки необходимо увеличение объема выборки испытуемых с промежуточными уровнями знания английского языка: Pre Intermediate, Intermediate.

На основании полученных результатов можно предположить, что уровень зрелости функции мозга, обеспечивающих восприятие и интерпретацию слов на английском языке, проявляется в разнице по времени решения задачи выбора и особенностях интерференции при реакции на родные русские и иностранные слова в контекстах билингвального теста Струпа. Заслуживает внимания факт, что эффекты интерференции обнаружены не у всех участников экспериментов. В группе Upper Intermediate интерференция отсутствует примерно у 25 % участников экспериментов как в русскоязычном, так и в англоязычном вариантах теста. В группе Elementary язык теста имеет большое значение: интерференция в два раза чаще проявляется по отношению к иностранному английскому языку, чем к родному русскому (44 % против 23 %). Это согласуется с результатами Sebastian с соавторами [9], которые показали, что наличие эффектов интерференции в тесте Струпа зависит от степени консолидации в памяти предъявляемых стимулов, в данном случае это были слова на иностранном языке, выученные в паре со словами, обозначающими цвета, на родном языке. Так, эффекты интерференции при предъявлении в качестве стимулов только новых слов на иностранном языке отсутствовали в тестировании сразу после обучающей сессии, но наблюдались в тестировании, проводимом через 24 ч после обучающей сессии.

Таким образом, время реакции в тесте Струпа можно рассматривать не только как отображение взаимодействия вербальных и зрительных образов, но и как информацию о качестве лингвистической модели [3], на основе которой реализуется интерпретация вербальных сигналов на иностранном языке.

Работа частично выполнена при поддержке гранта РГНФ № 15-06-10894.

Литература

1. *Altarriba J., Mathis K.M.* Conceptual and lexical development in second language acquisition // J. Mem. Lang. 1997. № 36, P. 550–568.

2. *Chen H., Ho C.* Development of Stroop interference in Chinese-English bilinguals // J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn. 1986. № 12. P. 397–401.

3. *Friston* K. Prediction, perception and agency // Int. J. Psychophysiol. 2012. № 83(2). P. 248–252.

4. *Jensen A.R., Rowher W.D.* The Stroop color-word test: a review // Acta Psychologica. 1966. V. 25. P. 36–93.

5. *MacLeod C.M.* Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review // Psychological Review. 1991. № 109. P. 163-203.

6. *Mägiste E.* Stroop tasks and dichotic translation: the development of interference patterns in bilinguals // J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn. 1984. № 1. P. 304–315.

7. *Preston M., Lambert W.* Interlingual interference in a bilingual version of the stroop color-word task // J. Verbal Learn. Verbal. Behav. 1969. № 8. P. 295–301.

8. *Rabipour S., Raz A.* Training the brain: Fact and fad in cognitive and behavioral remediation // Brain and Cognition. – 2012. – №79, P. 159–179.

9. *Sebastian G., Gaskell G.M., Zwitserlood P.* Stroop effects from newly learned color words: effects of memory consolidation and episodic context // Frontiers of psychology. 2015. V. 6. Article № 278.

10. *Stroop J.R.* Studies of Interference in Serial Verbal Reactions // Journal of Experimental Psychology. 1935. V. 18, № 6. P. 643–662.

Поиск вегетативных коррелятов лингвистических характеристик устной речи на материале диалогов на иностранном языке студентов языкового вуза

А.В. Бахчина[1], В.А. Демарева[1], Т.Н. Синеокова[2]

[1] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2]Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова

Введение

Работа посвящена изучению вегетативной регуляции сердечного ритма студентов лингвистического вуза при неподготовленной диалогической речи на иностранном языке. Обучение устной диалогической речи является одной из важнейших задач, включенных в перечень профессиональных компетенций студентов-лингвистов. Кроме того, предусматривается овладение как подготовленной, так и неподготовленной (спонтанной) формами речи. Актуальны вопросы, связанные с инструментальным контролем формирования лингвистической компетенции при изучении иностранного языка. Целью исследования является выявление корреляций между вегетативными реакциями и такими лингвистическими признаками устной речи, как паузы, обрывы, повторы, материально избыточные элементы.

Пятидесятилетний опыт изучения вариабельности сердечного ритма в отношении когнитивных процессов демонстрирует наличие связей между характеристиками вегетативной регуляции сердечного ритма и параметрами внимания. Так, Kalsbeek в исследованиях, посвященных объективной оценке умственной (mental) нагрузки, показал снижение вариабельности сердечного ритма у хирургов в процессе операции в ситуациях принятия решения – выбора дальнейшего хода операции из двух или более возможных вариантов [6]. Sayers продемонстрировал, что с возрастанием уровня сложности умственной (mental) нагрузки снижается степень выраженности в динамике сердечного ритма вазомоторных компонент, за счет чего снижается общая вариабельность сердечного ритма [2]. Taylor также демонстрирует обратную связь между вариабельностью сердечного ритма водителей и величиной пройденного расстояния. В данном случае управление автотранспортом рассматривается как когнитивная активность, требующая поддержания внимания и принятия решений в соответствии с внешней дорожной ситуацией [9]. Mulder в экспериментах с регистрацией времени реакции выбора демонстрирует снижение вариативности сердечного ритма в пробе по сравнению с фоном [7]. Показано, что при выполнении корректурной пробы (классический нейропсихологический тест на измерение степени концентрации и устойчивости внимания) достоверно снижаются мощности спектра вариабельности сердечного ритма в диапазонах низких и высоких частот [8]. Полевая с соавторами показали, что уровень неопределенности элементарных информационных образов отображается в степени дезорганизации сердечного ритма, определяемой по показателю (RRmax – RRmin)/t [4].

Таким образом, есть основания предполагать, что речь с синтаксическими особенностями, связанными с неопределенностью или неуверенностью при реализации последующих синтагм высказывания (паузы, повторы, обрывы и др.), в целом отображающими процесс внутреннего выбора речевого конструкта из ряда альтернатив, будет сопровождаться специфическими изменениями вариативности сердечного ритма.

Отличительной особенностью данного исследования от перечисленных и других имеющихся в этом направлении является непрерывная регистрация сердечного ритма в контексте естественной деятельности – практическое занятие по английскому языку. Таким образом, рассматривается автономная активность испытуемых, а не искусственно сформированная в лабораторном контексте.

Методы

В исследовании участвовало 5 человек, в возрасте от 19 до 20 лет, 4 женского, 1 – мужского пола, студенты Нижегородского государственного лингвистического университета по специальности «журналистика».

Перед каждым испытуемыми стояла задача: вести диалог с напарником на заданную тему (тема озвучивалась непосредственно перед выполнением задания) в течение 6 минут. Выполнение заданий происходило перед публикой – экспертами, которые оценивали испытуемых по следующим критериям: скорость речи, дикция, произносительные ошибки, ошибки в выборе слов, грамматические ошибки, ошибки в синтаксической структуре, информативность, логичность. Для инструментального контроля в эксперименте выбрана схема синхронизированного мониторинга динамики сердечного ритма и видеомониторинга динамики внешнего аудиовизуального контекста.

Непрерывное измерение динамики сердечного ритма производилось посредством телеметрической системы, которая включает в себя миниатюрный датчик HxM BT (Zephyr). Датчик крепится к эластичному поясу, в который вшиты два тканевых электрода. Пояс крепится на тело человека таким образом, чтобы испытуемому было комфортно и при этом различные движения не влияли на положение пояса. Пакетная передача данных от датчика к мобильному устройству производится по беспроводному протоколу BluetoothSPP 2,4 ГГц. Пакеты данных передаются с интервалом 1 с. Каждый пакет содержит уникаль-

ный идентификатор устройства, 15 последних RR-интервалов, время относительно начала записи. Предельное расстояние передачи сигнала 10 м до мобильного устройства. Реализация связи, передачи и сохранения данных производится на мобильном устройстве через специализированное программное обеспечение – «HR-Reader». Программная среда «HR-Reader» обеспечивает on-line визуализацию регистрируемой динамики RR-интервалов для контроля чистоты и целостности записи. Далее с мобильного устройства данные передаются по сети Интернет на сервер, где организована специализированная база данных, реализующая хранение, визуализацию и предобработку данных. Использование беспроводной системы регистрации сердечного ритма обеспечивает реализацию принципа экологической валидности в исследовании вегетативного обеспечения деятельности в контексте автономного поведения без ограничений по расстоянию и подвижности испытуемого.

Для анализа вегетативной регуляции сердечного ритма выбран представленный ниже набор статистических и спектральных показателей вариабельности сердечного ритма, которые в своей совокупности и/или в отдельности отображают активность центрального и/или автономного контуров регуляции сердечного ритма и, как следствие, связаны с такими психофизиологическими категориями, как уровень адаптационных ресурсов организма, напряжение регуляторных систем организма, режим энергообеспечения организма, эмоциональная дезадаптация, уровень субъективной сложности решаемой задачи и пр.

cpRR – средняя продолжительность времени между ударами сердца, средняя скорость функционирования системы кровообращения;

SDNN – стандартное отклонение массива RR-интервалов, интегративный уровень нервно-гуморальной регуляции сердечного ритма;

RMSSD – квадратный корень из суммы квадратов разности величин последовательных пар RR-интервалов, активность парасимпатического звена в регуляции сердечного ритма;

D – дисперсия, суммарная мощность всех периодических и непериодических колебаний сердечного ритма;

As – коэффициент асимметрии, степень стационарности сердечного ритма, выраженность переходных процессов в нервно-гуморальной регуляции сердечного ритма;

Ex – коэффициент эксцессивности, скорость изменения нестационарных процессов сердечного ритма;

MxDMn – разность между максимальным и минимальным значениями в массиве RR-интервалов, максимальная амплитуда регуляторных влияний;

TP – суммарная мощность спектра ВСР, общий уровень активности регуляторных процессов;

LF – мощность спектра ВСР в диапазоне низких частот, уровень активности симпатической регуляции сердечного ритма;

HF – мощность спектра ВСР в диапазоне высоких частот, уровень активности парасимпатической регуляции сердечного ритма;

LF/HF – частное мощностей спектра ВСР в диапазонах низких и высоких частот, уровень баланса в активности симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы.

Представленный набор методов математической обработки динамики сердечного ритма является избыточным, многие параметры тесно коррелируют друг с другом [1]. Важно, что все приведенные показатели имеют свои особенности и ограничения в использовании в разных типах последовательностей RR-интервалов (по времени, по степени стационарности и пр.), поэтому для анализа разного рода отрезков кардиоритма возможно замещение одних параметров другими.

Данные показатели вариабельности сердечного ритма вычислялись за целый период диалога, за периоды отдельных реплик, периоды слушания перед репликой.

Неподготовленная диалогическая речь была представлена обсуждением в парах проблемы “What does it mean – to love yourself?”. По данным видеозаписи были составлены транскрипты реплик испытуемых. В качестве лингвистических коррелятов в исследовании выбраны отдельные признаки, реализуемые в состоянии эмоционального напряжения [5], а также в спонтанной политической речи [3]. Ниже приведен список с названиями признаков и их рубрикатором для компьютерной обработки.

Повторы:

AR01 – артикуляторные персеверации без паузы,

AR02 – артикуляторные персеверации с паузой,

FR01 – ложный повтор,

TR00 – тавтологический повтор,

CR01 – повтор с лексической заменой,

CR02 – повтор с грамматической заменой (артикля, предлога, формы глагола, типа словосочетания и т.п.) ,

CR03 – повтор с фонетической заменой (неверно произнесенного звука) ,

TR01 – контактный повтор,

TR02 – дистантный повтор.

Разрывы:

RZ01 – пауза хезитации – семантизатор.

Обрывы:

BR01 – собственно обрыв,

BR02 – перебивает собеседник.

Материально избыточные элементы:

EM01 – МИЭ-паузозаполнители,

EM02 – МИЭ-акцентуаторы.

Каждая реплика испытуемых в диалоге была закодирована по следующим признакам: скорость речи (количество слов/время), наличие/отсутствие каждого из перечисленных лингвистических признаков, коэффициент присутствия в реплике каждого из признаков (количество повторов признака в реплике/количество слов в реплике).

В итоге 51 реплика испытуемых и соответствующее количество фрагментов последовательностей RR-интервалов были использованы для обработки.

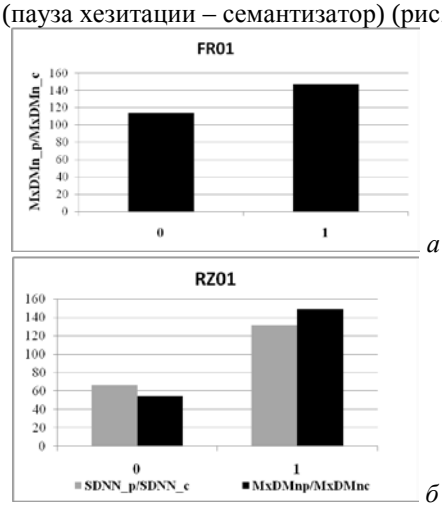
Из перечисленных лингвистических признаков только 3 были использованы в анализе (CR01, FR01, RZ01), так как остальные не были представлены в проанализированных выборках в достаточном количестве.

Для статистического анализа были использованы корреляционный анализ, сравнение выборок по критерию Манна-Уитни.

Результаты

При поиске связей между лингвистическими признаками и показателями вариабельности сердечного ритма была выявлена значимая отрицательная корреляция между коэффициентом присутствия признака CR01 (повтор с лексической заменой) в реплике и параметрами SDNN (N = 40, r = –0,64), MxDMn (N = 40, r = –0,66) за период реплики. Иными словами, повышение в реплике количества повторов с лексической заменой к общему количеству слов сопровождается снижением вариативности сердечного ритма, что может интерпретироваться как напряжение регуляторных систем организма, связанное с рассогласованием в речемыслительных процессах.

Для каждой реплики были вычислены коэффициенты соотношения показателей вариабельности сердечного ритма в период реплики к периоду предыдущего слушания. Выборки данных коэффициентов сравнивались между группами с наличием и отсутствием лингвистического признака в реплике. В итоге были выявлены значимые отличия (p < 0,05, критерий Манна – Уитни) для лингвистических признаков: FR01 (ложный повтор), RZ01 (пауза хезитации – семантизатор) (рис. 1).



а

б

Рис. 1. Средние значения коэффициентов соотношения показателей вариабельности сердечного ритма (SDNN, MxDMn) за период реплики к периоду предыдущего слушания в выборках реплик с наличием и отсутствием лингвистических признаков FR01 (*а*) и RZ01 (*б*)

Таким образом, наличие в реплике ложных повторов как признаков аффективной составляющей речи сопровождается бо́льшим повышением максимальной амплитуды нервно-гуморальных регуляторных влияний на сердце по сравнению с репликами, не содержащими этого признака.

Наличие в реплике паузы хезитации, речевого колебания, которое обычно связывают со спонтанностью речи – возникновением проблем выбора речевых единиц (слов и грамматических структур) и планирования предложения в целом, сопровождается увеличением интегративного уровня нервно-гуморальной регуляции сердечного ритма и максимальной амплитуды регуляторных влияний, в отличие от реплик без таких пауз. Такой эффект может быть интерпретирован как мобилизация регуляторных ресурсов организма, направленная на поиск адекватного речевого конструкта.

Выявлена значимая положительная корреляция между показателем SDNN за весь период диалога и оценкой экспертов (N = 5, r = 0,97, корреляции Спирмена), что отражает зависимость эффективности деятельности от изначального функционального состояния человека. Таким образом, выявлены возможные вегетативные корреляты лингвистических признаков устной речи.

Предлагаемая модель оценки способности студентов языковых вузов к поиску каузальных отношений позволяет выявить основные типы ошибок с опорой на объективные физиологические данные и дает возможность преподавателю прогнозировать и элиминировать сбои в восприятии информации. Интересным представляется дальнейшее воспроизведение полученных результатов, в том числе на материале родного и иностранного языков.

Предложенный в данной статье способ мониторинг режима вегетативной регуляции учащегося при воспроизведении языковых знаний, умений и навыков является потенциальным инструментом для персонифицированной оценки уровня субъективной сложности изученного или изучаемого материала. Данный способ не требует организации отдельных мероприятий для тестирования и имеет возможность использования внутри стандартных лингвистических практических занятий.

Публикация подготовлена в рамках поддержанного РГНФ научного проекта №15-36-01364.

Литература

1. *Бань А.С., Парамонова Н.А., Загородный Г.М., Бань Д.С.* Анализ взаимосвязи показателей вариабельности ритма сердца // Военная медицина: науч.-практ. рецензируемый журнал / Белорус. госуд. медиц. ун-т. Минск : Красико-Принт, 2010. № 4. С. 21–24.

2. *Доцоев Л.Я., Усынин А.М.* Вариабельность сердечного ритма у учащихся 9-х классов при выполнении корректурной пробы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Образование, здравоохранение, физическая культура, 2006. № 3–1.

3. *Лаврова А.А.* Синтаксические особенности реализации эмоционального компонента в политической речи (на материале американских предвыборных теледебатов): дис. … канд. филол. наук / Н. Новгород, 2010. 224 с.

4. *Полевая С.А., Каратушина Д.И., Шемагина О.В., Бахчина А.В., Ковальчук А.В., Парин С.Б.* Биологическая активность информационных образов в виртуальной компьютерной среде // Сб. науч. трудов 15-й всерос. науч.-техн. конф. «Нейроинформатика – 2013». Ч. 1. М. : НИЯУ, 2013. С. 11–20.

5. *Синеокова Т.Н.* Парадигматика эмоционального синтаксиса: Монография. Н Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2003. 244 с.

6. *Kalsbeek J.W., Sykes R.N.* Objective measurement of mental load // Acta Psychologica. 1967. № 27. P. 253–261.

7. *Mulder G.* Heart rate variability in a binary choice reaction task: an evaluation of some scoring methods // Acta. Psychol. (Amst.). 1972. V. 36, № 3. P. 239–251.

8. *Sayers B.A.* The analysis of cardiac interbeat interval sequences and the effect of mental work load // Proceedings of the Royal Society for Medicine. 1971. V. 64. P. 707–710.

9. *Taylor, J.A.* Spectral analysis of heart rate variability as an indicator of driver fatigue // Ergonomics. 1982. V. 25, № 7. P. 663–672.

Разработка и моделирование внешней системы поддержания динамической устойчивости человека с нарушением функции поддержания равновесия

А.В. Бахшиев[1], Б.А. Смольников[1], В.А. Леонтьев[1], Ф.В. Гунделах[1], П.Е. Мусиенко[2]

[1]Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики, С.-Петербург
[2]НИИ физиологии им. И.П. Павлова РАН, С.-Петербург

В обычной жизни при стоянии, ходьбе, целенаправленных движениях человек постоянно поддерживает позу тела, оптимальную для равновесия. Любые отклонения от основной позы тела приводят к постуральным (корректирующим позу) реакциям, в результате которых исходная поза восстанавливается. Поддержание устойчивости позы тела является жизненно важной функцией, и при ее нарушении больной человек теряет способность к активному передвижению в пространстве и полноценной жизни.

В настоящее время остро стоят проблемы реабилитации людей с ограниченной подвижностью из-за травм позвоночника и спинного мозга, инсультов и других нейромоторных заболеваний [1].

Анализ проблемы

Существующие нейрореабилитационные системы, разработанные для компенсации двигательных нарушений, основываются на пассивной пружинящей опоре, уравновешивающих механизмах или управлении усилием, которые генерируют вертикальные силы на уровне туловища во время движения по ленте тредбана [2]. Одним из общепринятых в мировых клиниках подходов нейрореабилитации является система тренировки функции ходьбы в роботизированном ортопедическом аппарате «Локомат» (Hocoma, Швейцария). Эта система обеспечивает движения в сагиттальной плоскости и поддержку веса тела в вертикальном направлении, тогда как для тренировки нормальной локомоции необходимы точная регулировка движения туловища практически во всех направлениях [3]. Заболевания и травмы головного и спинного мозга часто сопровождаются нарушением постуральной и локомоторной функций. Для восстановления активного передвижения в пространстве необходимы нейрореабилитационные мероприятия, направленные на обе оставляющие двигательной активности. Выделение этих подфункций имеет большое значение для оценки нарушений и последующей двигательной нейрореабилитации [4]. Концептуально нейрореабилитационные системы должны выступать в качестве нейропротеза, воздействующего как на двигательные (пропульсивные) свойства, так и на способность поддержания равновесия.

С учетом этого планируется разработать новые технологии и устройства для решения задач, упомянутых ранее. При этом предлагаемый проект может быть разбит на следующие основные направления работы, по каждому из которых может быть создан продукт для клинического использования и реализации на рынке медицинской техники:

• Разработка аппаратно-программного комплекса приводов и системы управления экзоскелета, обеспечивающего усиление двигательных способностей человека и функции поддержания равновесия. Реализация этого направления позволит выполнять задачи усиления коррекций положения тела в пространстве и ослабленной функции поддержки веса тела, замены утраченной функции при ее полном нарушении вследствие тяжелой вертеброспинальной травмы, а также восстановления утраченной функции в ходе тренировок.

• Разработка аппаратно-программного комплекса миостимуляторов и системы управления для функциональной электростимуляции специфических мышц конечностей и туловища, обеспечивающих баланс в различных статических и динамических двигательных актах. Реализация этого направления позволит в определенных условиях также решать задачу усиления коррекций положения тела в пространстве и дополнительно проводить обучение движению и поддержанию равновесия через согласованную активацию требуемых групп мышц внешними стимулирующими устройствами.

• Комбинация этих двух подходов в одной нейрореабилитационной технологии.

Постановка задачи

Из сказанного выше следует, что задача создания средств реабилитации людей с ограниченной подвижностью разделяется на 2 подзадачи – создание «жесткой» и «мягкой» систем управления балансом, которые должны обладать соответствующими функциями.

Жесткая система – это экзоскелет в классическом понимании этого слова, позволяющий полностью или частично брать на себя утраченные функции человека;

Мягкая система представляет собой систему управления и неинвазивной активации мышц опорно-двигательного аппарата человека с целью восстановления правильного комплексного функционирования групп мышц.

Независимое решение каждой из этих задач позволит создать новые средства реабилитации людей с повреждениями опорно-двигательного аппарата.

Комплексная система, объединяющая эти решения, выведет процесс реабилитации на новый уровень, существенно упростив его процедуру и снизив требования к персоналу.

Разработка экзоскелета с описанными выше требованиями требует разработки комплекта алгоритмов, которые можно разбить на следующие группы:

1. Разработка математической модели экзоскелета и модели мышечного аппарата для управления собственным скелетом человека.

1.1. Уточнение кинематической схемы.

1.2. Проработка требований к приводам.

1.3. Нейрофизиологические и модельные математические эксперименты по выяснению рефлекторных и нейрональных механизмов контроля равновесия при стоянии и передвижении.

2. Разработка алгоритмов управления движением и поддержания устойчивости экзоскелета при возмущающих воздействиях внешних сил, во время локомоции в разных условиях обычной жизни (по ровной и наклонной поверхностям, по прямой и изогнутой траектории, при преодолении препятствий, перемещении по лестнице).

3. Разработка алгоритмов фазной стимуляции (оптимальных паттернов активации) специфических мышц туловища и конечностей при тех же двигательных задачах, что и в п. 3.

4. Апробация разработанных алгоритмов, макетов и тестовых образцов на здоровых добровольцах. Клинические испытания новой технологии нейрореабилитации у больных с нейромоторными расстройствами.

5. Клинические испытания новой технологии нейрореабилитации у больных с нейромоторными расстройствами.

Ниже рассматриваются некоторые из этих задач.

Разработка математических моделей экзоскелета

В разработке математических моделей экзоскелета можно выделить следующие этапы, рассматриваемые ниже.

Анализ структурной схемы экзоскелета в виде плоской кинематической цепи. Вначале предлагается рассмотреть простейшую структурную схему экзоскелета в виде плоской кинематической цепи (ПКЦ). Такая ПКЦ функционально представляет собой изолированную половину полного экзоскелета. Возможен выбор рабочей схемы ПКЦ экзоскелета в виде, например, 5-звенной или более многозвенной плоской кинематической цепи, (рис. 1).

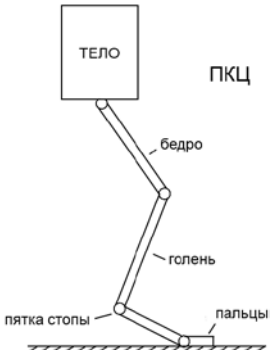


Рис. 1. Простейшая плоская кинематическая схема ноги

Имеет смысл разделять общее количество степеней подвижности модели на активные (управляемые) и пассивные (снабженные упруго-диссипативными элементами). Далее необходимо составить статические и динамические уравнения движения ПКЦ для описания различных режимов ее функционирования.

После этого становится возможным провести анализ режимов свободных и управляемых движений модели для определения областей их устойчивости. И далее, провести построение законов управления основными рабочими движениями рассматриваемой ПКЦ, и осуществить поиск оптимальных режимов управления ими.

Анализ схемы парного взаимодействия двух ПКЦ. Необходимо провести рассмотрение схемы парного взаимодействия двух ПКЦ (рис. 2), присоединенных к несущему телу («спине»), исключая «руки», и тем самым образующих пространственную конструкцию экзоскелета (ПКЭ). Основные пункты работ здесь следующие:

- Учет дополнительных эффектов кинематического и динамического взаимовлияния двух ПКЦ в составе выбранной пространственной модели экзоскелета.
- Численное моделирование управляемых пространственных движений экзоскелета и их анализ.

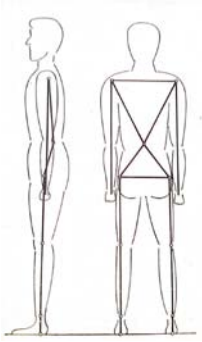


Рис. 2. Пространственная конструкция экзоскелета

После этого становится возможным провести сопоставление и возможное расширение разрабатываемой модели до точного ее соответствия конструкциям существующих образцов.

Описание математической модели носителя экзоскелета

В настоящей стадии работ по созданию математической модели комплекса «человек + экзоскелет», носитель экзоскелета рассматривался как некая твердотельная модель, состоящая из двух «ног», двух «рук», «торса» (туловища) и «головы», соединенных между собой как одностепенными (вращательными), так и трехстепенными (сферическими) шарнирами. На такую модель тела человека впоследствии может быть «надета» модель экзоскелета, в шарнирах которой, если экзоскелет активного типа, должны находиться рабочие сервоприводы. Общее количество шарниров зависит от степени детализации моделей человека и экзоскелета, и соответствующее число

степеней свободы может достигать многих десятков. Однако для имитации основных движений тела можно ограничиться 15–20 степенями свободы, причем многие из них в силу симметрии тела будут парными.

В силу специфики функционирования скелета человека и экзоскелета наиболее важную роль в них играют шарниры нижних конечностей (ступней, голени и бедра). Менее существенную роль для мобильности данного комплекса играют шарниры рук, головы и таза. Что касается отдельной ноги, то она рассматривается здесь как четырехзвенный шарнирный механизм (см. рис. 1), прикрепленный к тазовому модулю посредством трехстепенного сферического шарнира (см. рис. 2). Таз присоединен к торсу также с помощью сферического шарнира. Голень соединена с коленным суставом с помощью одностепенного вращательного шарнира. Ступня крепится к голени в данной модели сферическим шарниром. Пальцы стопы изменяют свой наклон по отношению к стопе в специально введенном вращательном шарнире (для моделирования, например, стояния и ходьбы «на цыпочках»). Рука моделируется двухзвенником, прикрепленным сферическим шарниром к торсу и имеющим одностепенной вращательный шарнир в локте.

Предварительная твердотельная модель тела человека была разработана в программном пакете ADAMS/VIEW в виде многопараметрического твердотельного механизма. При этом в шарнирах данной модели могут быть либо назначены движения суставов с целью вычисления моментов, мощностей и сил реакции, требующихся для этого, либо назначаются управляющие моменты в зависимости от времени, и как следствие вычисляются и визуализируются соответствующие движения компьютерной модели.

В модели введены 36 свободных параметров, которые могут задавать ее геометрию и начальное положение (конкретную конфигурацию, а также смещения и повороты модели в целом), которое должно быть задано перед началом моделирования движения.

Модель имеет 7 сферических шарниров и 6 цилиндрических шарниров, т. е. общее число степеней свободы математической модели носителя экзоскелета с учетом положения и наклона торса в глобальной системе координат равно:

$$33\ (7 \times 3 + 6 \times 1 + 6).$$

Разработанная модель тела человека как носителя экзоскелета в дальнейшем должна быть дополнена моделью собственно экзоскелета. Это позволит моделировать и изучать взаимосвязанную динамику перемещения тела и поддержания позы человека и экзоскелета, а также исследовать различные алгоритмы управления данной системой на предмет их оптимизации.

На основе этой модели может быть разработана полномасштабная модель системы человек – экзоскелет, решающая поставленные выше задачи [5].

Исследование структуры и функций нейронных сетей управления движением

Анализ контроля баланса при стоянии и активных движениях, таких как ходьба, является трудной задачей из-за различных механизмов, работающих одновременно. Одним из возможных подходов к решению этой проблемы является компьютерное моделирование системы управления, но реалистичное моделирование требует детального знания о соответствующих нейронных цепях [6, 7]. С использованием другого подхода (проведение острого эксперимента на децеребрированной кошке) удалось проанализировать отдельно ряд рефлекторных механизмов, контролирующих постуральные реакции отдельных конечностей и туловища. Один из механизмов конечностей работает в фазе перемещения и обеспечивает стандартное положение для постановки конечностей на поверхность. Два других механизма конечностей работают в фазе поддержания позы; они противодействуют искажению паттерна движения опорно-двигательного аппарата путем регулирования жесткости конечностей. Механизм конфигурации туловища контролирует форму тела на основе сенсорной информации, поступающей от афферентов тела. Постуральные реакции, полученные с помощью этих четырех механизмов, интегрируются, образуя реакцию всей системы на отклонения от положения равновесия во время передвижения [8].

Разработка алгоритмов управления движением функциональных элементов экзоскелета

В разработке систем управления рассматриваемого комплекса важная роль отведена нейронным сетям. Использование нейронных сетей является наиболее подходящим для решения следующих задач:

- разработка моделей естественных нейронных структур управления движением;
- разработка нечеткой системы поддержания равновесия и движения экзоскелета с учетом возмущений, вносимых носителем.

Большинство нейрорегуляторов, существующих на сегодняшний день, основаны на применении модели формального нейрона, однако такая модель существенно упрощена, что делает ее далекой от моделирования реальной работы нейронов. Помимо формальной модели нейрона разработано большое число моделей, описывающих нейрон с точки зрения химии протекающих процессов.

Была решена задача согласованного управления несколькими подвижными элементами робототехнической системы с помощью нейросетевых регуляторов. В исследовании в качестве объекта управления использована модель двухзвенного манипулятора. Каждый регулятор должен обеспечивать поддержание заданного положения звена в пространстве в своей системе координат. Согласованная работа регуляторов положения звена обеспечивается с помощью схожего по структуре ре-

гулятора, находящегося на более высоком уровне управления.

Таким образом, исследования показали способность нейронной сети запоминать и воспроизводить положения исполнительной системы робота, а также возможность использования аналогичной схемы для реализации более высокого уровня управления в задаче управления несколькими звеньями [9, 10].

Заключение

Задача создания экзоскелета для реабилитации людей с ограниченной подвижностью требует проведения большого объема исследований и разработки новых решений в сфере создания аппаратного и в области программного обеспечения. В настоящее время ведутся работы по моделированию аппаратного обеспечения экзоскелета, исследования естественных нейронных сетей управления движением и разработка их технических аналогов для наиболее эффективного и естественного решения задачи управления движением экзоскелета.

Литература

1. *Thuret S., Moon L.D.F., Gage F.H.* Therapeutic interventions after spinal cord injury // Nature Reviews Neuroscience. 2006. V. 7, №. 8. P.628-643.
2. *Frey M. et al.* A novel mechatronic body weight support system // IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng. – 2006. V. 14. P.311–321.
3. *Winter D.A., MacKinnon C.D., Ruder G.K., Wieman C.* An integrated EMG/biomechanical model of upper body balance and posture during human gait // Progress in brain research. 1992. V. 97. P. 359–367.
4. *Dominici N., Keller U., Vallery H., Friedli L., van den Brand R., Starkey M.L., Musienko P., Riener R., Courtine G.* Versatile robotic interface to evaluate, enable and train locomotion and balance after neuromotor disorders // Nature medicine. 2012. V. 18, №. 7. P. 1142–1147.
5. *Smolnikov B.A.* Проблемы в механике и оптимизации роботов. М. : Наука, 1991.
6. *Ekeberg O., Pearson K.* Computer simulation of stepping in the hind legs of the cat: an examination of mechanisms regulating the stance-to-swing transition. // J. Neurophysiol. 2005. V. 94. P. 4256–4268.
7. *Pearson K, Ekeberg O., Büschges A.* Assessing sensory function in locomotor systems using neuro-mechanical simulations // Trends Neurosci. 2006. V. 29. P. 625–631.
8. *Musienko P.E., Deliagina T.G., Gerasimenko Y.P., Orlovsky G.N., Zelenin P.V.* Limb and trunk mechanisms for balance control during locomotion in quadrupeds // J Neurosci. 2014. V. 34(16). P. 5704–16.
9. *Бахшиев А.В., Клочков И.В., Косарева В.Л., Станкевич Л.А.* Нейроморфные системы управления роботами // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. №2(3). С. 40–44. (Изд. ЦНИИ РТК)/
10. *Бахшиев А.В., Романов С.П.* Моделирование структурно-функциональных свойств мембраны и организации синаптического аппарата нейрона для описания и исследования нейронных структур управления движением // XV Всероссийская научно-техническая конференция “Нейроинформатика-2013”: Сборник научных трудов. В 3 ч. Ч. 2. М. : НИЯУ МИФИ, 2013. С. 35–40.

О закономерностях эволюционной динамики систем, формирующих когнитивные элементы

Н.С. Беллюстин [1], В.Ю. Савельев [1], Ю.А. Сизов [2]

[1]Научно-исследовательский радиофизический институт, Н. Новгород
[2]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В последнее время растет поток данных об эволюционных процессах в открытых системах различного типа. Это позволяет уже в настоящее время детализировать и уточнять на математическом языке нелинейной динамики те наиболее общие закономерности развития Природы, которые двести лет назад формулировались на философском языке в виде законов диалектики Гегеля. Такой путь должен в итоге привести к единому математическому описанию тех процессов, которые до недавних пор рассматривались отдельно – от процессов физической эволюция Вселенной и ее объектов до эволюции наземной: химической, геологической, биологической, социальной. Последние типы связаны с переходом эволюции к живым системам, а затем и к естественным когнитивным системам типа человека, реализующим процесс познания окружающего мира путем построения эффективных моделей и использования их для прогнозирования и управления.

Важно, что вплоть до настоящего времени у нас имеется только один достоверный пример эволюционного развития от дожизненных форм до естественных когнитивных систем – это эволюция на нашей Земле, которая заняла по времени последние 4 млдр. лет. Вопрос об альтернативных формах разумной жизни давно привлекал внимание любопытных людей, но лишь в последние годы растущий объем научных данных позволяет формировать в этой области знания полноценное научное направление, связанное с наблюдениями и экспериментами. Это обусловлено, прежде всего, тем, что на фоне растущих технологических возможностей цивилизации мы теперь достаточно много знаем о планетах нашей Солнечной системы и открыли еще сотни экзопланет в других звездных системах. Эти обстоятельства делают особенно актуальным разработку теоретического инструмента, который кроме решения других задач поможет более системно искать когнитивные формы разумной внеземной жизни.

Имеющиеся на сегодня данные по эволюционирующим системам различного типа свидетельствуют, что эволюционный процесс идет неравномерно и характеризуется чередованием периодов роста с периодами застоя и/или спада и что периодам резких подъемов в эволюционном развитии обычно предшествуют периоды серьезного спада.

Эти закономерности качественно отражает график на рис. 1, где схематически показан типовой пример нелинейной эволюционной динамики. График иллюстрирует, что периоды относительно спокойного эволюционного развития чередуются с периодами качественной перестройки поведения системы. При этом причиной такой перестройки может быть и достаточно сильное внешнее воздействие на систему, и внутренний системный кризис, вызывающий неустойчивость и бифуркацию. Эволюционный график грубо разделяется на несколько монотонных участков с простым математическим описанием в виде степенной, показательной или логарифмической функции.

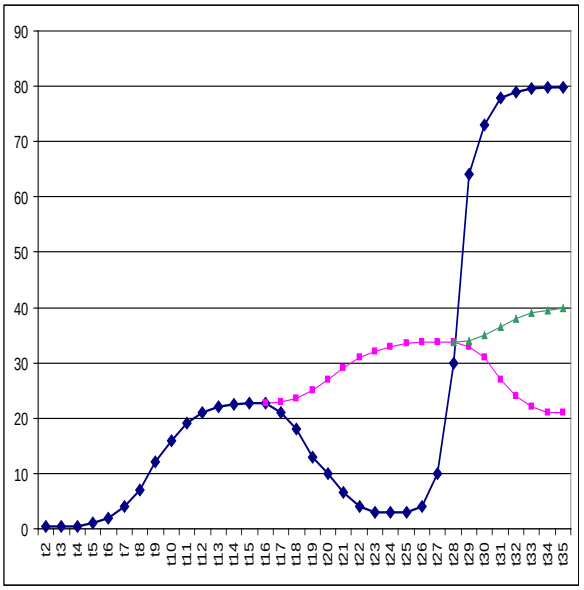


Рис. 1. Схематический график типичной нелинейной динамики эволюционного развития. По горизонтальной оси – время, по вертикальной оси – количественная характеристика, связанная с уровнем сложности организации системы

На графике на рис. 1 развитие системы на начальном этапе отсутствует, интервал $t_2 - t_4$. Затем происходит постепенный рост эволюционной характеристики с замедлением (например, по логарифмическому закону) и выходом на плато – наступает динамическое равновесие системы, (имеющее вид плато время $t_{13} - t_{16}$). Это означает, что система идеально адаптировалась к среде. Но такое «динамическое равновесие» не может существовать сколь угодно долго – система приближается к точке перестройки – точке качественного изменения режима эволюционного развития. На рис. 1 примерами таких точек являются t_{16} и t_{28}. Причиной перестройки может оказаться достаточно сильное внешнее воздействие: для наземной эволюции такое воздействие неоднократно было связано с падением на Землю достаточно крупного небесного тела. Эволюционная перестройка может иметь причиной и внутренний системный кризис – письменно зафиксированная история

человеческой цивилизации изобилует примерами такого сорта за несколько последних тысячелетий.

Начиная с точки t_{17} на рис. 1, присутствуют различные сценарии эволюционного развития: достигнув точки перестройки, система может либо продолжить свое развитие и дальнейшее усложнение, либо перейти к снижению уровня, который происходит обычно быстрее адаптации. Однако обычно распад систем идет до уровня сложности более высокого, чем тот, с которого система начинала предыдущий виток развития (см. t_{24} на рис. 1, нижняя кривая). В рассматриваемом примере глубокий кризис способствовал резкому эволюционному подъему (см. t_{35} на рис. 1).

Приведенная схема эволюции носит общий характер и может быть соотнесена с универсальным концептом в когнитивной системе человека, которые применяются в гуманитарных и философских исследованиях [1]. Мы полагаем, что такое представление, формируемое на известных данных о поведении открытых систем, является методологической основой для выделения систем как объектов изучения из материального мира. Так, если экспериментально наблюдаемая эволюция объекта не соответствует этим общим законам, это означает, что в состав системы или введено то, что не является ее частью, либо не введено то, что в нее входит. Такой подход позволяет явно связать процесс выделения и изучения системы с наблюдателем и временно отложить исследование внутренней структуры системы.

Недостатком такого подхода является неоднозначность выбора критериев различными наблюдателями. Впрочем, при такой процедуре выделения системы, как и при любых других, основой является согласие или несогласие специалистов. Преимуществом же является естественность самого действия, основанного на восприятии наблюдателя (это, кстати, позволяет включить в круг рассматриваемых систем явления мира искусства) и его простота.

Отметим, что временные законы (показательный $y = a^t$, степенной $y = t^b$ и логарифмический $y = \log(t/t_1)$) широко распространены в природе. Так, изменение температуры расширяющейся Вселенной T во времени t описывается формулой $T(t) = ct^{-1/2}$ (например, [2]); степенные и экспоненциальные зависимости описывают развитие бактериальных клеток (например, [3]); степенной закон описывает структуру биологических сообществ (например, [4]); степенные зависимости наблюдаются в лингвистике и экономике (например, [5]), и даже в распределении кадров [6].

Отметим также, что обсуждаемый здесь переход к языку математического описания может быть использован также и для уточнения базовых терминов при описании эволюционных процессов, в частности и самого термина эволюционирующей системы. Например, систему будем относить к классу эволюционирующих систем в том и только в том случае, если ее динамическое развитие соответствует математически сформулированным закономерностям. Если такого соответствия нет, система не соответствует термину эволюционирующей системы. Такой подход представляется естественным, когда ставится задача описания поведения системы как единого целого [7], при этом предлагаемый подход может помочь устранить некоторые неопределенности.

Выводы

1. Эволюционное развитие в различных открытых системах имеет общие закономерности, которые важно постепенно переводить с языка философских законов на математический язык нелинейной динамики.

2. Предложенное направление исследований формирует инструмент идентификации открытых эволюционирующих систем, формирующих когнитивные элементы.

3. Методы нелинейной динамики позволяют совершенствовать и уточнять терминологию, применяемую для описания эволюционирующих систем.

Литература

1. *Александров О.А., Андреева О.А.* Универсальные концепты в когнитивной системе человека // Филологические науки. Вопросы теории и практики. 2010. № 3 (7). С. 26–29.

2. *Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р.* Физика процессов эволюции. М. : УРСС, 2001. С. 23.

3. *Жирмунский А.В., Кузьмин В.И.* Критические уровни в развитии природных систем. Л. : Наука, 1990. С. 29–31

4. *Гелашвили Д.Б., Иудин Д.И., Розенберг Г.С., Якимов В.Н., Шурганова Г.В.* Степенной закон и принцип самоподобия в описании видовой структуры сообществ // Поволжский экологический журнал. 2004. № 3. С. 227–245.

5. *Мандельброт Б., Хадсон. Р.Л.* (Не)послушные рынки. Фрактальная революция в финансах. М. : Изд. дом «Вильямс», 2006. С. 193–200.

6. *Гаджиев Б.Р., Прогулова Т.Б., Щетинина Д.П., Кузин А.Е.* Эволюция сети киноактеров // Сб. трудов XVI междунар. конф. «Математика. Компьютер. Образование» / под общей редакцией Г.Ю. Ризниченко. Ижевск : Научно-исследовательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. Т. 1. С. 398–410.

7. *Анохин П.К.* Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. М. : Наука, 1973. С. 12–13

Когнитивное моделирование исследовательской деятельности научных коллективов

К.И. Белоусов

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Разработка научным коллективом (далее – НК) своей предметной области (далее – ПрО) обусловлена множеством социальных (научный статус, возраст, гендер и др.), технологических, финансовых, дисциплинарных (естественно-научные, технические, социальные, гуманитарные науки), пространственно-временных, информационных и когнитивных факторов. Особый интерес представляют факторы, характеризующие сам процесс интеллектуальной деятельности НК, результатом которого является полученное новое знание о ПрО.

Под *научной предметной областью* мы понимаем аспект некоторого фрагмента действительности, который выделяется, структурируется и интерпретируется в соответствии с целями, методами, инструментарием научной деятельности, осуществляемой над некоторым классом объектов. Например, на классе объектов тексты мы можем выделить ПрО ПСИХОЛИНГВИСТИКА ТЕКСТА, которая с помощью экспериментальных методов изучает механизмы порождения, восприятия (понимания) текста (и текстов).

Научная ПрО представляет собой создаваемую индивидуальными и коллективными агентами научного производства открытую мультиструктурную информационную систему, в которой осуществляется непрерывный интра- и интерпредметный процесс обмена информацией по доступным информационным каналам. Результатом информационных процессов становится постоянное обновление содержательной и структурной составляющих научной ПрО [1]. В то же время, если рассматривать ПрО как открытую мультиструктурную информационную систему, в которой каждый из ее компонентов находится в процессе постоянного изменения в силу непрерывно меняющегося контекста, то процесс концептуализации каждого “узла” системы, проявляющийся благодаря образованию новых связей между «узлами» (см., например, [2]) позволяет говорить о создаваемой модели как о концептосфере ПрО.

Создаваемая модель ПрО не является ее онтологией, которой может быть назван целостный, устойчивый, воспроизводимый и кодифицированный сегмент. В нашем случае речь идет как о кодифицированных, отраженных в энциклопедиях, знаниевых единицах, так и о некодифицированных (которых значительно больше).

Операциональными единицами исследования служат ключевые слова (далее – КС) и наборы ключевых слов (далее – НКС), выносимые авторами публикаций из своих статей. Обращение к НКС научных публикаций обусловлено тем, что: а) посредством НКС авторы сами обозначают доминанты концептуального пространства своих исследований; б) НКС научных публикаций представляют собой легко формализуемый конструкт в рамках большого корпуса текстов; в) НКС, в отличие от статьи, к которой они относятся, обычно доступны для автоматизированного извлечения.

Если рассмотреть статус терминологических единиц, выносимых авторами научных статей в позицию ключевых слов, то можно обнаружить, что значительную их часть нельзя отнести ни к терминосистеме, ни даже к терминологии изучаемой ПрО. Одна часть КС к научным статьям представляет собой общенаучный слой терминологии (КАТЕГОРИЯ, СИСТЕМА и др.), другая содержит специальную лексику, характерную либо для языкознания в целом (ЯЗЫК, ПРЕДЛОЖЕНИЕ и др.), либо для других его разделов/направлений (ДИСКУРС, ИНТЕРТЕКСТУАЛЬНОСТЬ и др.). И наконец, внушительная по объему часть КС относится не к терминологии, а к номенклатуре (ЛЕЗГИНСКИЙ ЯЗЫК, ЛЕКСЕМА «НОЧЬ» и мн. др.).

Таким образом, наборы ключевых слов к научным публикациям представляют собой предметно-понятийный субстрат (термины, номены, онимы), относящийся к разным подсистемам и структурам информационного пространства науки: терминологии и номенклатуре; общенаучным, дисциплинарным, частнонаучным предметным областям. Термины, номены, онимы, не относящиеся напрямую к исследуемой предметной области, тем не менее, крайне значимы для нее: без этого предметно-понятийного субстрата невозможно представить ни характер научной когниции, нельзя осуществить ни синхронный срез предметной области, ни предложить ее ретроспективную или перспективную модель развития.

Анализ КС и НКС в конкретных публикациях представляет особый интерес для изучения научной когниции. На уровне используемой терминологии ПрО могут заметно отличаться при отнесении специальной лексики к разрядам шкалы «абстрактное – конкретное» (термин – номен – оним). В таких дисциплинах, как лингвистика и математика доминирует абстрактный «полюс»; в химии, биологии, медицине преобладают единицы номенклатуры; онимы играют важнейшую роль в литературоведении. Естественно, данные различия обусловливают специфику научного мышления и дискурсивных практик. Однако и в рамках одной науки, и даже одной частнонаучной ПрО, могут наблюдаться значительные различия в использовании терминологии отдельными исследователями и/или научными коллективами. То же самое можно сказать и о другом аспекте функционирования научных понятий, рассматриваемых в контексте реализации в них универсальных кате-

горий (вещество (энергия, информация), процессы, состояние, качества и мн. др.) и их композиций (см. [3, 4]). Важным структурным (и когнитивным) аспектом использования понятия является степень сложности его терминологической структуры, формально отображаемой посредством количества терминоэлементов [3]. Чем выше уровень разработанности ПрО, тем чаще присутствуют единицы протяженной структуры. Предпочтение же более сложных терминов отражает стремление исследователя четче обозначить свою ПрО.

Помимо отнесенности отдельных КС из НКС к разным подсистемам науки, интерес представляет порядок следования КС (здесь НКС получает текстуальное измерение). Например, в НКС «КАРТИНА МИРА, ЛЕКСИКО-СЕМАНТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, СТРУКТУРА, ГРУППЫ, ПОДГРУППЫ, КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ» [5] прослеживается закономерность. Сначала дается КС общегуманитарной парадигмы (КАРТИНА МИРА), выступающее в качестве объекта исследования. Затем следует КС, проясняющее лингвистический аспект изучения данного объекта (ЛЕКСИКО-СЕМАНТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ). Далее следует КС, репрезентирующее общенаучное понятие СТРУКТУРА; при этом данное КС является гиперонимом для КС ПОЛЕ, используемого для описания структурной организации языковых единиц, имеющих общую семантику. Затем НКС разворачивается в ГРУППЫ, являющиеся обозначениями общностей (множеств) и ПОДГРУППЫ – в данном случае подчеркивается структурность ГРУПП. И завершается НКС указанием на основной подход к исследованию ПрО – КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ. Таким образом, в анализируемом НКС порядок его отдельных компонентов мотивирован логикой научной когниции, задающей следующий сценарий: 1) от общегуманитарного объекта к частному лингвистическому предмету; 2) гиперонимический перенос на общенаучную область с обозначением методологии. Заметим, что сценарный потенциал научной когниции в случае с НКС имеет много вариантов реализации (в том числе и «отсутствие» сценария – непродуманного, случайного расположения КС).

Характерной чертой научной когниции, ярко проявляющейся как у отдельных исследователей, так и у научных коллективов, является выбор следования научному тренду и игнорирования (в той или иной степени) его. Научный тренд представляет собой актуальное для данной ПрО направление исследований с собственной научной парадигмой. Научный тренд репрезентируется, в частности, посредством прецедентных текстов и «собственной» терминологии. Следование научному тренду облегчает создание ПрО; тренд рассматривается в качестве прототипа научной деятельности и служит ориентиром в процессе создания собственного научного пространства по образцу уже созданного. Кроме того, тренд выступает и в качестве эталона, т. е. выполняет аксиологическую функцию. Анализ следования научным трендам и их игнорирования возможен с помощью обращения к статистике использования терминов (например, представленной на ресурсе http://elibrary.ru/). Частота использования терминов является важным аспектом наблюдения за деятельностью индивидуальных и коллективных агентов научного производства. Так, например, регулярное использование «собственных» терминов (низкочастотных, характеризующих только отдельный научный коллектив или научную школу) не только свидетельствует о намерении ввести термины в научный оборот, но и дает представление о самостоятельном характере научной когниции данной социокультурной общности (вероятно, именно в силу такой природы когниции и можно говорить о самой социокультурной общности). Не менее важным фактором является процесс обновления ПрО, т. е. введение новых терминов и исключение использованных ранее. Изучение процесса обновления ПрО может опираться на коэффициенты, вычисляемые, например, в виде отношения суммы количества новых и исключаемых терминов к общему количеству терминов, используемых агентами научного производства за определенный период времени.

В данной работе мы затронули некоторые аспекты научной когниции индивидуальных и коллективных агентов научного производства. В целом, очерченная предметная область является востребованной, так как в настоящее время существует запрос на создание доступных инструментов эффективного планирования исследовательской деятельности.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 15-06-06373).

Литература

1. *Белоусов К.И., Баранов Д.А., Зелянская Н.Л.* Научный коллектив и его предметные области (к вопросу о методах эффективного планирования научной деятельности) // Научно-техническая информация. Сер. 1. Организация и методика информационной работы. 2014. № 4. С. 13–26.

2. *Павиленис Р.И.* Проблема смысла: современный логико-философский анализ языка. М. : Мысль, 1983. 286 с.

3. *Лейчик В.М.* Терминоведение: предмет, методы, структура. М. : Издательство ЛКИ, 2007. 256 с.

4. *Табанакова В.Д.* Категориальное моделирование научной терминологии в прикладных целях // Структурная и прикладная лингвистика. 2007. № 7. С. 233–238.

5. *Ерофеева Е.В., Пепеляева Е.А.* Структура семантического поля «ЧЕЛОВЕК» в сознании носителей русского языка // Вестник Пермского университета. Российская и зарубежная филология. 2011. Вып. 1 (13). С. 7–19.

Квазиаттракторы морфометрических параметров организма человека как пример эволюции complexity

Д.К. Берестин, Л.С. Шакирова, А.Л. Романчук, А.С. Козлов, Н.А. Черников

БУ ВО ХМАО-Югры «Сургутский государственный университет»

Введение

Чувствительность организма к воздействию экологических и социальных факторов не остается постоянной в разные возрастные периоды онтогенеза. Процесс роста и развития наиболее уязвим тогда, когда он характеризуется наибольшей интенсивностью, т. е. максимальной величиной годовых приростов. В нашем случае речь идет о пубертатном периоде и о его изучении, несомненно, представляющем особый научный интерес.

До настоящего времени не имеется сравнительных модельных (математических) исследований по оценке ростовых процессов в организме детей, проживающих на Севере и в Республике Башкортостан (РБ) в рамках изменения *H* и *M* с позиций их хаотической динамики. Именно в теории хаоса – самоорганизации эта динамика может быть оценена в рамках этих подходов, отличных от традиционных стохастических. Еще в меньшей степени исследованы механизмы формирования адаптивной реакции на экстремальные условия растущего детского организма. Это составило вторую задачу нашего исследования. В итоге мы сейчас говорим о разных моделях динамики *H* и *M* детей разных природно-климатических условий.

Решение указанных вопросов особенно актуально при оценке здоровья детей – северян, при проведении профилактических медицинских осмотров, при разработке оздоровительных программ и при проведении коррекций, направленных на сохранение и укрепление здоровья развивающегося организма. Индивидуальная изменчивость в скорости физического развития может привести к значительному несоответствию между хронологическим и биологическим возрастом развития детей, к нарушению в динамике роста и массы детей [1–3].

1. Объект и методы исследования

Объектом настоящего исследования стали школьники (мальчики) в возрасте от 6 до 16 лет, учащиеся гимназии № 10, лицея № 3 г. Сургута, а также учащиеся школы № 16 г. Приютово (Республика Башкортостан). Из всех 10 групп мы выбрали обследуемых из трех возрастных групп – 6, 11, 16 лет (n = 22 в каждой группе), что обеспечило статистическое различие полученных выборок. Все дети были обследованы по стандартной антропометрической программе. На основе измерений рассчитывались компоненты массы тела и рост с позиции стохастики и теории хаоса и самоорганизации. Были использованы методы исследования в виде антропометрии, которая предусматривает измерение параметров тела стандартными измерительными инструментами. Для оценки физического развития в данном сообщении использовались только два антропометрических показателя: рост (*H*) и масса (*M*) тела. При измерении и взвешивании ребенок был раздет до трусов, без обуви. Взвешивание проводилось в определенное время – утром.

Измерение длины тела у детей производится с помощью ростомера в виде доски. Боковая сторона ростомера представляет собой сантиметровую шалу, вдоль которой скользит подвижная поперечная планка. Ребенка укладывают в ростомер на спину так, чтобы его макушка плотно прикасалась к неподвижной поперечной планке ростомера.

2. Расчет параметров эволюции биосистем

Предлагается построение кинематики сложных систем (систем третьего типа) на основе моделирования движения вектора состояния этих систем $x(t)$ в фазовом пространстве состояний. Поскольку доказано, что для систем третьего типа постоянно $dx/dt \neq 0$, а $f(x)$ для любых последовательных выборок (кардиоинтервалов, например) непрерывно изменяется, то разработан аппарат для расчета движения центров квазиаттракторов (областей фазового пространства, в которых $x(t)$ непрерывно изменяется). Вводится понятие скорости и ускорения эволюции [1–6].

Общеизвестно, что в естествознании активно используются два базовых подхода для идентификации стационарных режимов: $dx/dt = 0$ или рассчитывается функция $f(x)$, которая условно не изменяется. Фактически, эти же требования используются и при идентификации схожести (однотипности) двух систем или процессов, если по своим параметрам они показывают одинаковость x_i, т. е. $x_i^1 = x_i^2$ по всем i=1, 2, …, m для 1-го (x_i^1) и 2-го (x_i^2) процессов или объектов. Иными словами, понятие стационарного режима в терминах вектора состояния и фазового пространства состояний (ФПС) обеспечивает идентификацию схожести (подобия) систем, объектов, процессов. Поэтому мы особым образом выделяем это понятие (стационарные режимы) для систем третьего типа (СТТ), так как они не могут демонстрировать ни $dx/dt = 0$, ни сохранение функций распределения $f(x)$ для любой биосистемы даже на коротком интервале времениΔt. В целом классический подход в оценке стационарных режимов СТТ невозможен в принципе.

Объем квазиаттрактора (КА) мы находим как произведение вариационных размахов Δx_i по каж-

дой координате x_i, т. е. $\Delta x_i = x_{i\max} - x_{i\min}$ (разность крайне правой координаты $x_{i\max}$ и крайне левой координаты $x_{i\min}$ на оси x_i). Координаты центра квазиаттрактора x_i^c можно найти и из уравнения $x_i^c = x_{i\min} + \left(\left(\Delta x_i\right)/2\right) = \left(x_{i\max} + x_{i\min}\right)/2$. Иными словами, объем V_G будем определять из формулы

$$V_G = \prod_{i=1}^{m} \Delta x_i , \qquad (1)$$

а координаты центра КА x_i^c находятся из уравнения

$$x_i^c = \left(x_{i\max} + x_{i\min}\right)/2 . \qquad (2)$$

Для дальнейших рассуждений представим определение КА в рамках традиционных математических понятий.

Квазиаттрактор – ненулевое подмножество Q фазового n-мерного пространства D $l = \overline{1,m}$ динамической биологической системы (ДБС), являющееся объединением всех значений $f\left(t_i\right)$ состояния биологической динамической системы на конечном отрезке времени $\left[t_j,\ldots,t_e\right]$ ($j << e$, где t_j – начальный момент времени, а t_e – конечный момент времени состояний ДБС)

$$Q = \bigcup_{l=1}^{m} \bigcup_{i=j}^{e} f^l\left(t_i\right),\ Q \neq 0;\ Q \in D , \qquad (3)$$

где m – количество координат x_i пространственных измерений.

В качестве основной меры квазиаттрактора используется объем (V_G) области Q m-мерного пространства, внутри которого заключены все значения $f\left(t_i\right)$ состояния биологической динамической системы на промежутке времени $\left[t_j,\ldots,t_e\right]$,

$$V_G = \mathrm{mes}(Q) = \prod_{i=1}^{m}\left(\max\left(f^l\left(t_j\right),\ldots,f^l\left(t_e\right)\right)\right) \qquad (4)$$

На основании понятия квазиаттрактора можно ввести критерий существенных или несущественных различий в параметрах изменения положения центра КА и объемов многомерных КА. Точку отсчета для существенных изменений объемов мы будем определять как двукратное изменение объема КА биосистемы, если мы сравниваем объем КА до воздействия (до изменений) – V_G^1 и объем КА после воздействия (изменения) – V_G^2. Иными словами, если $1/2 \le V_G^1/V_G^2 \le 2$, то изменения V_G будут несущественными (например, в пределах вариационных размахов).

Если же

$$V_G^1/V_G^2 \ge 2 \text{ или } V_G^1/V_G^2 \le 0{,}5 , \qquad (5)$$

то будем говорить о существенном изменении биосистемы по параметрам объема КА.

Движение центра КА рассчитывается покоординатно. Если по всем координатам x_i мы имеем смещение центра x_i^{c2} на величину R_i^*, превышающую сумму половин исходного вариационного размаха $\Delta x_i^1/2 + \Delta x_i^2/2$ (т. е. центр после смещения вышел за пределы $\Delta x_i^1/2$ размеров исходного радиуса $r_i^1 = \Delta x_i^1/2$), то мы будем говорить о существенных изменениях в биосистеме. При этом эти смещения должны произойти по всем координатам x_i всего ФПС. В целом необходимо учитывать покоординатные радиусы (они составляют половину от вариационного размаха Δx_i) начального КА r_i^1 и конечного КА $r_i^2 = \Delta x_i^2/2$ по каждой координате x_i. Превышение суммы этих радиусов по всем i для реального расстояния R_i^* между центрами исходного и конечного КА (x_i^{c1} и x_i^{c2}) действительно сигнализирует о существенном смещении центра КА за время Δt. Если это наблюдается по отдельным координатам x_i, то мы будем говорить о начале существенного смещения КА в ФПС.

В целом стационарный режим теперь будет характеризоваться такими параметрами системы, когда нет существенных изменений в параметрах КА. При этом мы точно регистрируем микрохаос (неопределенность внутри квазиаттрактора), так как вектор состояния демонстрирует непрерывное движение в виде $dx/dt \neq 0$, и все $f\left(x\right)$ будут непрерывно изменяться (но нет существенных движений центров КА!) [4, 5, 7].

3. Примеры расчета эволюции СТТ

Особым образом нами исследовалось движение КА вектора состояния организма учащихся по морфометрическим параметрам учащихся Севера и Средней полосы РФ. В этих примерах мы брали только двумерный случай, когда x_1=*H* и x_2=*M* (рис. 1, 2).

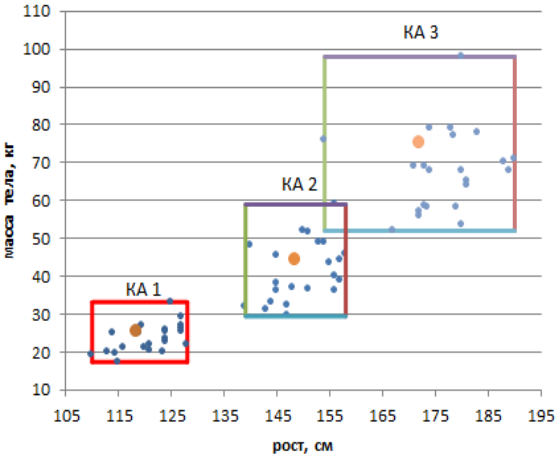


Рис. 1. Квазиаттракторы антропометрических параметров мальчиков, учащихся Югры, в различные возрастные периоды (6, 11, 16 лет)

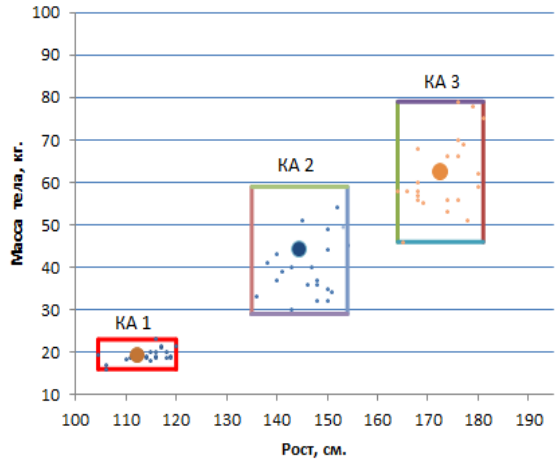


Рис. 2. Квазиаттракторы антропометрических параметров мальчиков, учащихся Республики Башкортостан, в различные возрастные периоды (6, 11, 16 лет)

Анализируя значения площадей КА, полученных в результате обработки антропометрических параметров трех возрастных групп мальчиков 6, 11, 16 лет – учащихся г. Сургута и г. Приютово, представленных на рис. 1 и 2, легко видеть, что площади КА находятся в разных диапазонах. С возрастом объемы КА учащихся Югры постепенно нарастают от V_1 = 284,4 у.е. до V_2 = 560,5 у.е. и в конце пубертатного периода до V_3 = 1656 у.е. Однако объемы КА учащихся Республики Башкортостан достигают абсолютного максимум в 12 лет (V_2 = 570 у.е.), затем незначительно уменьшаются до (V_3 = 561 у.е.). Иными словами, динамика изменения параметра V для КА существенно отличается [1–5].

На примере изменения объемов КА [2, 3] рассчитаем критерии существенных или несущественных различий, т. е. должно выполняться неравенство (5). Для учащихся Югры при сравнении 1-й и 2-й возрастных групп V_G^2/V_G^1 = 1,97, т. е. эта величина очень близко подходит к пределу существенного изменения КА (предел равен 2), тогда как для 2-й и 3-й возрастных групп V_G^3/V_G^2 = 2,95, что является существенным изменением объема КА. Для учащихся Республики Башкортостан наблюдается совсем иная динамика изменения объемов КА. Для 1-й и 2-й групп V_G^2/V_G^1 = 5,25, что является существенным изменением, и оно превосходит вариационный размах почти в 3 раза. Однако для 2-й и 3-й групп V_G^3/V_G^2 = 0,98, это говорит о том, что объем КА 3-й группы почти не изменился в сравнении со вторым квазиаттрактором. Налицо существенные различия в динамике изменения роста и веса мальчиков Югры и Республики Башкортостан.

Все вышеуказанные результаты представлены в сводной таблице 1, где можно видеть существенные различия между объемами V_G для учащихся Югры и Республики Башкортостан. Очевидно резкое увеличение объемов квазиаттракторов старшей группы учащихся Югры.

Таблица 1

Объемы КА антропометрических параметров мальчиков, учащихся Югры и Республики Башкортостан по анализу данных антропометрических параметров

Объем	Учащиеся Югры	Учащиеся РБ
1-й КА (у.е.)	284,4	108,5
2-й КА (у.е.)	560,5	570
3-й КА (у.е.)	1656	561

Таким образом, динамика изменения квазиаттракторов учащихся Югры и Республики Башкортостан заметно различается, параметры $КА_1$ и $КА_2$ как для учащихся Югры, так и для учащихся Республики Башкортостан не перекрывают друг друга, тогда как $КА_2$ и $КА_3$ для учащихся Югры частично перекрываются, а для учащихся Республики Башкортостан не пересекаются. Для подтверждения этого тезиса в рамках расчетов скорости движения КА представим расчеты кинематических характеристик КА в виде: r_i^k – радиус k-го КА по i-й координате, а R_i^* соответствует по каждой координате x_i реальному расстоянию между центрами исходного и конечного КА, Zij – межаттракторное расстояния (у.е.) между центрами КА. Этот подход реально демонстрирует скорость эволюции биосистемы в фазовом пространстве состояний по параметрам центра КА, что существенно отличается от эволюции Пригожина – Недорфа, о которой говорил В. Эбелинг [1–7].

Рассчитав все характеристики КА для групп мальчиков учащихся Югры и Республики Башкортостан можно определить скорость движения центра КА биосистемы в фазовом пространстве состояний [4, 5]. Для учащихся Югры она составляет: $\upsilon_{1,2} = Z_{1,2}$ у.е./ t лет = 35,48 у.е./ 5 лет = 7,10 у.е./год, а $\upsilon_{2,3} = Z_{2,3}$ у.е./ t лет = 38,7 у.е./ 5 лет = = 7,74 у.е./год, тогда как для учащихся Республики Башкортостан она будет составлять $\upsilon_{1,2} = Z_{1,2}$ у.е./ t лет = 40,5 у.е./ 5 лет = 8,10 у.е./год, а $\upsilon_{2,3} = Z_{2,3}$ у.е./ /t лет = 33,56 у.е./ 5 лет = 6,71 у.е./год.

Так же возможно произвести расчет скорости эволюции биосистемы в фазовом пространстве состояний по формуле $\upsilon_{эв} = V_G^2/V_G^1$ у.е./ t лет.

Таким образом, скорость эволюции для мальчиков Югры между первым и вторым КА будет равна $\vartheta_{эв}^{1,2} = 1,97 \text{у.е.} / 5 \text{лет} = 0,39 \text{у.е./лет}$, а для второго и третьего квазиаттрактора получим $\vartheta_{эв}^{2,3} = 2,95 \text{у.е.} / 5 \text{лет} = 0,59 \text{у.е./лет}$. Для учащихся Республики Башкортостан скорость эволюции первого и второго квазиаттрактора будет равна $\vartheta_{эв}^{1,2} = 5,25 \text{у.е./5лет} = 1,05 \text{у.е./лет}$, а для второго и третьего КА $\vartheta_{эв}^{2,3} = 0,98 \text{у.е./5лет} = 0,19 \text{у.е./лет}$.

В целом все вышеуказанные результаты представлены в сводной таблице 2.

Таблица 2

Значения кинематических характеристик квазиаттракторов учащихся Югры и Республики Башкортостан

	Учащиеся Югры	Учащиеся РБ
$Z_{1,2}$	35,48	40,50
$Z_{2,3}$	38,70	33,56
$Z_{1,3}$	73,02	74,02
r_{x1}^{1}	8,50	7,75
r_{x2}^{1}	7,90	3,50
r_{x1}^{2}	9,50	9,50
r_{x2}^{2}	14,75	15,00
r_{x1}^{3}	18,00	8,50
r_{x2}^{3}	23,00	16,50
$R_{x1}^{1,2*}$	30,00	32,25
$R_{x2}^{1,2*}$	18,95	24,50
$R_{x1}^{2,3*}$	23,50	28,00
$R_{x2}^{2,3*}$	30,75	18,50
$R_{x1}^{1,3*}$	53,50	60,25
$R_{x2}^{1,3*}$	49,70	43

Выводы

1. С позиции теории хаоса и самоорганизации показаны примеры расчета параметров движения КА в фазовом пространстве состояний, которые мы представляем в виде эволюции СТТ. Продемонстрировано движение центра КА и его выход за пределы исходного КА, что представляет собой реальную кинематику СТТ. В рамках этого подхода определены скорость эволюции и ее характер в виде поступательного движения изучаемых КА.

2. Подобные схемы расчета на основе анализа изменения объемов КА и скорости движения центров КА при развитии организма сейчас становятся возможными к использованию при анализе любых эволюционных процессов сложных биосистем СТТ – complexity.

Литература

1. *Еськов В.М., Назин А.Г., Русак С.Н., Филатова О.Е., Хадарцева К.А.* Системный анализ и синтез влияния динамики климато-экологических факторов на заболеваемость населения севера РФ // Вестник новых медицинских технологий. 2008. Т. 15. № 1. С. 26–29.
2. *Брагинский М.Я., Еськов В.М., Лазарев В.В., Русак С.Н.* Методы измерений соотношений между хаосом и стохастикой в оценке влияния динамики метеофакторов Югры на организм человека // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2010. Т. 9, № 1. С. 195–199.
3. *Eskov V.M.* Evolution of the emergent properties of three types of societies: The basic law of human development // Emergence: Complexity and Self-organi-zation. 2014. V. 16, №2. P. 107–115.
4. *Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Зимин М.И.* Неопределенность в квантовой механике и биофизике сложных систем // Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2014. № 5. С. 41–46.
5. *Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вахмина Ю.В.* Кинематика биосистем как эволюция: стационарные режимы и скорость движения сложных систем – complexity // Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2015. № 2. С. 62–73.
6. *Ebeling. W.* Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen. Eine Einführung in die Theorie dissipativer Strukturen // BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig. 1976. S. 194.
7. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. М. : УРСС, 2004. 128 с.

Сохранение, передача и использование знаний на основе технологии «прямого наложения знаний»

Г.Б. Бронфельд

Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева

Среди перспективных технологий, которые помогут решить проблему «сатурации» («перенасыщения информацией») [1], выделяется технология прямого наложения знаний (ТПНЗ) [2–8]. Первым ТПНЗ в 90-х годах использовал Д. Грей [9] при создании «виртуальной астрономической обсерватории» для обработки численных данных наблюдений за звездным небом. Однако, видимо, Д. Грей не сообразил, что этот эффект применим в широком аспекте в иных предметных областях для разных видов знаний при использовании разных интеллектуальных систем (ИС).

ТПНЗ основана на подходе, использующем интеграцию знаний. Вообще, знания содержатся в разной форме. В частности, и известный философ К. Поппер, и академик Д.А. Поспелов, говорили, что знания об окружающем мире отражены и в книгах, и в документах, созданных человеком. Это тексты в соответствии с принятым подходом в лингвистике. Специалистов при решении текущих проблем интересуют тексты, множество которых определенного предметного направления называется сверхтекстом.

Попробуем промоделировать знания новым методом. Известно из лингвистики, что «простое предложение… было и остается основной единицей синтаксиса текста... наиболее существенной чертой предложения является его способность формировать и выражать мысль» [10]. Используем это.

Метод описания знаний моделью, названной молингой [2–8], заключается в следующем. Каждое простое предложение текста (сложные делятся на простые) представляется семантической сетью с составлением словарей терминов (включая синонимы), отношений, качественных признаков и т.д. Из предложений убирается эмоциональная окраска, они упрощаются с сохранением основных риторических отношений.

Молинги имеют формальный вид :

$$D\ ;\ P;\ Z;\ K;\ O;\ N;\ W.$$

Здесь D – множество идентификаторов, с помощью них молинга выделяется из всего множества молинг. При выдаче ответа может восстанавливаться близкий к исходному текст. Элемент P – условие применимости ядра молинги. Ядро молинги Z представляет собой простое предложение текста. В K указаны номера словарей, фиксирующих положение в ядре молинги, терминов, отношений, качественных признаков и т. д. В O зафиксированы уровни достоверности молинг, например в виде факторов уверенности, впервые примененных в экспертной системе (ЭС) *MYCIN*. Элемент N описывает постусловия молинги. W – множество вспомогательных идентификаторов.

В результате база знаний (БЗ) ИС представляется огромным набором коротких семантических сетей специального вида, внешне читаемых как вполне ясные достаточно короткие предложения (подробнее в [2–8]).

При вводе знаний в виде молинг в БЗ указываются идентификаторы, из какого текста-источника и места в исходном тексте. Повторение знаний, уже содержащихся в БЗ и полученных ранее из других источников, приводит к повышению достоверности имеющихся знаний. Чего нет – вводится и увеличивает объем БЗ, т.е. с каждым новым введенным текстом БЗ подобной ИС представляет собой новую версию. Введение противоположного утверждения, уменьшает достоверность уже введенного. Расчетные модели и визуальные и графические образы запоминаются и подключаются через постусловия. Подобный подход позволяет сохранять знания в актуальном состоянии столетиями и тысячелетиями без всяких специальных дополнительных затрат [5, 8].

Такой процесс создания БЗ ИС для интеграции знаний и будем называть ТПНЗ.

Ключевая особенность – значительно меньший объем БЗ сверхтекстов по сравнению с другими способами получения БЗ, с иными моделями знаний. А это приводит к ускорению поиска ответа даже с одинаковыми методами логического вывода – от десятков и сотен раз быстрее до практической бесконечности при полном переборе.

ИС с БЗ на основе ТПНЗ могут иметь следующие три базовых варианта: с массовым производством для индивидуального потребителя в варианте «интеллектуальная электронная книга» (ИЭК), названная автором элингой, в индивидуальном варианте для отдельного предприятия (организации) в варианте «аналитическая система управления знаниями» (АСУЗ) и в виде библиотеки аналитического накопления знаний (БАНЗ) для традиционного массового потребителя на почти бесплатной основе пользования.

Идею работы над общим полем знаний в понятном для него варианте высказал в 40-х годах прошлого века бывший советник по науке президента Рузвельта В. Буш [11], что даже подтолкнуло развитие гипертекстовой технологии.

Именно в частичном разрешении этой основной проблемы и заключается основной эффект проекта ИЭК – элинга.

Элинги позволят:

- заносить в них постепенно большое количество знаний;
- получать ответ почти со скоростью расчетных программных средств без изучения технической литературы, задавая вопросы элинге;

• приобретать их по низкой стоимости (о чем мечтал В. Буш);

• работать в широкой предметной области (в отличие от ЭС, которые работают только в узкой области и для ограниченного набора задач);

• пользователю получать со временем результаты на уровне лучших специалистов мира и выше.

В состав элинги входят программные средства, реализующие машину вывода, интеллектуальный интерфейс, БЗ и сервисные и вспомогательные программы. БЗ включает в себя словари терминов, отношений и др. (и их синонимов), собственно знания, содержащиеся в текстах в виде молинг, расчетные модели (реализованные в виде отдельных подпрограмм, ускоряющих работу элинги и повышающих ее ценность), визуальные и графические образы.

Физически элинги представляют собой съемное устройство хранения информации со специальной машиной вывода и БЗ. Одновременно могут создаваться элинги по многим направлениям знаний. Каждые 1–2 квартала будет выходить новая версия элинги определенного направления с новой расширенной версией БЗ.

Могут существовать две модификации элинг – просто в виде комплекса программ и БЗ и в виде специально разработанного и массово производимого машинного носителя знаний (МНЗ) на основе изобретения [3, 4]. В МНЗ те же алгоритмы обработки, как и в первом варианте, но реализуются с помощью встроенных микропроцессорных средств, обеспечивающих более высокую скорость работы и усложняющих возможность копирования и воспроизводства.

Логический вывод в элинге проводится на основе *modus ponens* (в простейшем виде «если *A*, то *B*»), где в качестве *A* и *B* используются термины из словарей терминов, которые помечены в каждой молинге. Причем не имеет значения, в каком порядке находятся термины в молинге. При этом выводятся последовательно варианты возможных сочетаний молинг, упорядоченные по уровню фактора уверенности. Но выводятся блоками, не перегружая информацией пользователя.

Логический вывод в ИС ведет нередко к неограниченному перебору вариантов, даже при относительно простых запросах, что создает проблемы в общении с пользователем. Однако элинги создают здесь новые возможности.

Для чего пользователь обращается к системе?

Чтобы получить знания, как ему, например, обрабатывать конкретную деталь. Есть, например, отработанные автоматизированные системы технологической подготовки.

Ну а если в детали есть некие особенности конструкции или материалов, не предусмотренные технологической системой? Тогда ему приходится искать решение самостоятельно – вот тут требуется элинга. Пользователь задает вопрос системе и пошла цепочка ответов в виде блоков взаимосвязанного текста на основе разных принципов, в том числе при логическом выводе – через связь понятий или использование имманентных свойств исходных текстов – когезии (локальной связности) [12] и когерентности (связности в пределах текста) [12]. И хотя получаемый текст совершенно искусственен (совместное творчество компьютера с пользователем), он обладает свойством интертекстуальности, является линейным (хотя получен нелинейным образом) в основных блоках и обладает свойством семантической связности.

В элинге возможна выдача значительной части БЗ даже по одному запросу. Но это не нужно, поскольку пользователь не в состоянии воспринять выдаваемые элингой огромные объемы знаний. А критерии реения часто и самому пользователю не ясны [13], и в задаче нет всех необходимых условий и ограничений.

В теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) [13] и методе «мозгового штурма» используется путь создания определенной среды и условий для эффективной работы по поиску решений для пользователя.

В элинге также создается своя специальная среда для ускоренного и эффективного нахождения рациональных решений.

Такой подход к восприятию решения задач высказал и Дж. Пойа: «Найти решение задачи – это значит установить связь между заранее дифференцированными объектами или идеями (...предпосылкой и заключением)…» [14].

Назовем применяемый в элинге (а также в АСУЗ/БАНЗ) подход диалогоассоциативным поиском [2–8]. Каждый раз при подаче запроса сложно сказать, найдет ли пользователь необходимый ответ и каков он будет, но зато можно уверенно утверждать, что пользователь разберется в интересующем его вопросе намного лучше. И одна из главных особенностей – быстро, поскольку не надо обращаться вначале ни в другие книги, ни в другие библиотеки, ни к другим специалистам, ни в другие организации (конечно, при достаточной развитости элинги).

В 2013 г. был опубликован патент US 8583422 *System and method for automatic semantic labeling of natural language texts* (Система и способ для автоматического семантического маркирования текстов естественного языка) [15], авторы Д. Тодхантер, И. Совпель, Д. Пастанохау из компании *Invention Machine Corporation* (IMC, США, основные разработчики находятся в Минске, Беларусь). Основателем компании IMC является В.М. Цуриков, разработчик программного комплекса «Изобретающая машина» (1988 г.), который поддерживал технологию ТРИЗ, созданную Г. Альтшуллером [13]. Теперь уже с помощью компьютерной системы ТРИЗ позволяла находить решения на уровне изобретений. Затем, уже в США, основав фирму IMC, В.М. Цуриков развил и преобразовал эту систему, получив постепенно десятки патентов в разных странах. В нулевые годы его основная система стала называться *Invention Machine Goldfire*. Одними из важных дополнительных возможностей стали лингвистический и семантический ана-

лиз текстов в Интернете и реферирование интересующих результатов с выдачей пользователю [16, 17]. Этот метод подходил для реферирования текстов, но, конечно, совершенно не мог конкурировать с возможностями подхода [2–8], в первую очередь в связи с ограниченными возможностями используемых моделей знаний – *SAO*-структур. Однако эта группа патентов *IMC* послужила хорошим опорным прототипом для получения патентов [3, 4]. В дальнейшем логика решаемых проблем подвела *IMC* к необходимости расширения возможностей используемых моделей знаний, а соответственно возможностей логического вывода. И вот в новом патенте [15] они сделали решительный скачок и перешли к расширенной модели знаний *eSAO*, которая по возможностям и размеру соответствует молинге. Кроме того, они впервые ввели в описание патента возможность участия эксперта в работе системы в диалоге с компьютером, что сразу заложено в элинге, в том числе зафиксировано в патентах [3, 4]. При этом автоматический логический вывод, зафиксированный в патентах для почти одинаковых моделей знаний, тоже оказывается близким, судя по описанию. Однако присутствует разная терминология и разное целевое назначение, и все-таки разница в некоторых возможностях.

В целом можно констатировать, что проявилось новое направление в развитии ИС – интеллектуальные системы создания нового смысла, что прямо обеспечивается участием человека в процессе диалога элинги с пользователем, а у компании *IMC* уже поддерживается алгоритмической основой и фактически уже заложено в описании патента.

Литература

1. *Прайс Д.С.* Большая наука, малая наука // Наука о науке. М. : Прогресс, 1966. С. 281–384.

2. *Бронфельд Г.Б.* Об одном подходе к построению интеллектуальных электронных книг и о молинге // Труды Восьмого междунар. симпозиума «Интеллектуальные системы». М.: РУСАКИ, 2008. С. 230–234.

3. Пат. на полезную модель № 104348, РФ, МПК G06 N 5/00. Система для работы с интеллектуальной электронной книгой – элингой – носителем знаний // Бронфельд Г.Б.; заявка № 2010127899/08 от 26.07.2010; опубл. 10.05.11. Бюл. №13.

4. Пат. № 2440610 РФ, МПК G06 N 5/00. Система для работы с интеллектуальной электронной книгой – элингой / Бронфельд Г.Б.; заявка № 2010125501/08 от 21.06.2010; опубл. 20.01.12. Бюл. №2.

5. *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.

6. *Бронфельд Г.Б.* Возможности интеллектуальных электронных книг – элинг в образовательном процессе // Инновационные технологии в образовательной деятельности / Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. Н.Новгород, 2014. С. 70–81.

7. *Бронфельд Г.Б.* Основы искусственного интеллекта: учеб. пособие / Г.Б. Бронфельд; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. Н. Новгород, 2014. 253 с.

8. *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.

9. *Gray J., Czalay A.* The World – Wide Telescope, an Archetype for Online Scienc. 2002. 6 p.

10. *Диброва Е.И.* и др. Современный русский язык. Теория. Анализ языковых единиц: в 2 ч. М. : Академия, 2008. Ч. 1. – 480 с.; Ч. 2. – 624 с.

11. *Bush V.* As We May Think //Atlantic Monthly, July 1945. P. 101–108.

12. *Лукин В.А.* Художественный текст. Основы лингвистической теории. Аналитический минимум. М. : Ось-89, 2009. 560 с.

13. *Альтшуллер Г.С.* Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. Новосибирск : Наука, 1986. 209 с.

14. *Пойа Дж.* Математическое открытие (Решение задач: основные понятия, изучение и преподавание). М. : Наука, 1976. 448 с.

15. US Patent No 8,583,422. System and method for automatic semantic labeling of natural language texts / *J. Todhunter, I. Sovpel, D. Pastanohau* (12.11.2013).

16. *Совпель И.В.* Система автоматического извлечения знаний из текста и ее приложения // Искусственный интеллект. Минск, 2004. № 3. С. 668–677.

17. US Patent No 6,167,370. Document semantic analysis/ selection with knowledge creativity capability utilizing subject-action-obbject (SAO) structures / *V. Tsourikov, L. Batchilo, I. Sovpel* (26.12.2000).

Оптимизация когнитивной нейротерапии при помощи электроэнцефалографии

С. Великова

Smartbrain, Осло, Норвегия

Для того чтобы обеспечить более эффективные и персонализированные нейро-терапевтические процедуры, принципы принятия терапевтических решений модифицируются: постепенно происходит замена подходов, основанных исключительно на диагнозе (этиологический подход), основанными на понимании механизмов нарушений (патогенетический подход).

Надежным методом для объективного исследования механизмов когнитивных нарушений является электроэнцефалография (ЭЭГ), и особенно применение ее количественных показателей (QEEG). Существенно, что этот метод неинвазивен, удобен для применения и относительно дешев.

Возможные области практического использования в повседневной практике:

- *для оказания помощи в постановке дифференциального диагноза в случаях с подозрением на ухудшение когнитивных функций и для мониторинга изменений в когнитивных сфере;*
- *фармако-ЭЭГ – для выбора препаратов, основанного на сочетании между их ЭЭГ-профилем и ЭЭГ-профилем когнитивных нарушений;*
- *определение фенотипа заболевания на основе ЭЭГ и уточнение его нейрофизиологического механизма.*

Определение фенотипа ЭЭГ при синдроме дефицита внимания и гиперреактивности (СДВГ) является полезным инструментом для прогнозирования терапевтического ответа на фармакологические стимуляторы. Известно, например, что люди с СДВГ, у которых пиковая частота альфа-активности лежит в относительно низкочастотном диапазоне (а такие параметры характерны примерно для одной трети пациентов с СДВГ), не получают пользы от применения стимуляторов [1]. QEEG может быть применена также для формирования правильного протокола при нейрофидбэк-терапии (NFT – БОС-терапии). В некоторых случаях (особенно у взрослых пациентов с дефицитом внимания) применение ЭЭГ может позволить выявить дополнительное наличие таких проблем, как, например, злоупотребления психоактивными веществами.

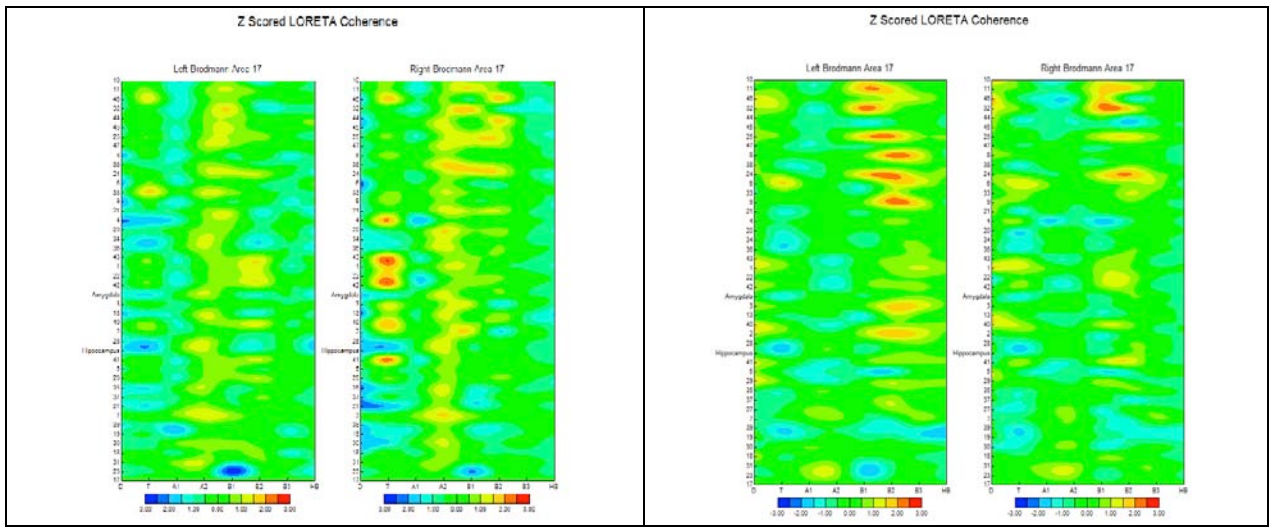
Различные клинические подтипы дислексии имеют характерные ЭЭГ-паттерны [2]. Но, основываясь на ЭЭГ, можно дополнительно разделить эти подтипы на основе нарушений в определенном частотном диапазоне: например, нарушения функциональной связи в зрительном информационном канале у разных лиц могут быть связаны с различными частотами; поэтому определение клинического подтипа может конкретизировать общие подходы к реабилитации зрительной системы, но в дальнейшем определение точного функционального механизма по параметрам ЭЭГ поможет обеспечить максимальную персонализацию нейрофидбек-терапии. На рис. 1 представлены различия в когерентности ЭЭГ (исследована с помощью метода ЛОРЕТА) до и после применения NFT у 11-летней девочки с диагнозом дислексия.

У детей с интеллектом ниже среднего уровня (в отсутствие генетических нарушений и при наличия адекватного обучения) ЭЭГ может характеризоваться: низкой амплитудой, низкой пиковой частотой в альфа-диапазоне, нарушением функциональных связей между различными областями мозга и т. д. Таким образом, анализ ЭЭГ позволяет точно планировать шаги для улучшения когнитивных функций, основываясь на знаниях о конкретных механизмах.

На рис. 2 показан случай с 11-летней девочкой. Первая ЭЭГ соответствует периоду, когда у нее были проблемы с приобретением знаний и уровень IQ по Векслеру был 81 (low average). Вторая ЭЭГ зарегистрирована спустя 8 месяцев применения нейрофидбэк-терапии, когда ей удавалось учиться в школе без проблем и IQ был 92. Основное различие между обеими ЭЭГ состоит в увеличении амплитуды в альфа-диапазоне в 6,5 раза.

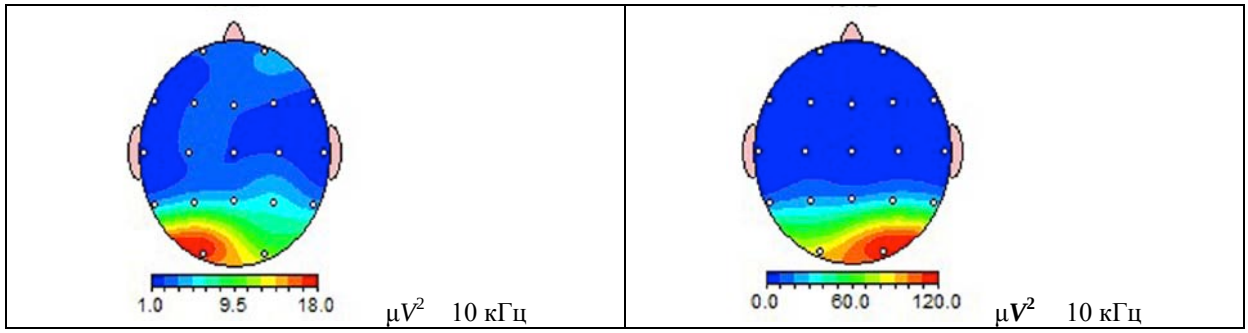
- *ЭЭГ может помочь выявить дефицит некоторых химических элементов.* Например, при выявлении повышенной амплитуды бета-активности в лобной области следует обратить внимание на исследования уровня магния [3], который важен для когнитивных функций. Дефицит магния частой обнаруживается при расстройствах аутистического спектра [4] и дефиците сенсорной интеграции. На рис. 3 представлены ЭЭГ 12-летней девочки с нарушениями аутистического спектра до и через 1 месяц после приема магния (300 мг в день). Прием магния был связан с клиническим улучшением и нормализацией бета-ритма в лобной области.
- ***ЭЭГ** как дополнительный инструмент для мониторинга употребления психоактивных веществ или злоупотребления ими.* Увеличение пиковой частоты альфа-активности известно как маркер использования стимуляторов, а увеличение амплитуды альфа-ритма наблюдается во время кокаиновой абстиненции [5].

В период повышенной тяги (craving) к психостимуляторам наблюдается снижение когерентности дельта-ритма, которая нормализируется сразу после приема препарата. Рисунок 4 демонстрирует снижение когерентности дельта-ритма в периоде craving (тяги к кофеину и никотину) и нормализацию через 20 мин после приема стимуляторов.



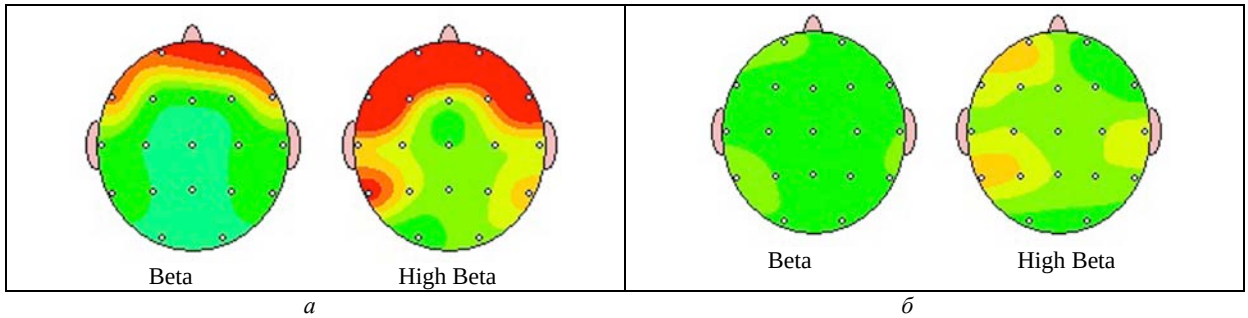
а *б*

Рис. 1. До терапии (*а*) – снижение функциональной связи (темно-синий цвет) между первичной зрительной корой (BA17) и другими областями (такими как гиппокамп и posterior cinculate (BA23)). После терапии (б) – улучшение после применения нейрофидбек-терапии. *результаты отражают сравнение с нормативной базой данных (www.appliedneuroscience)



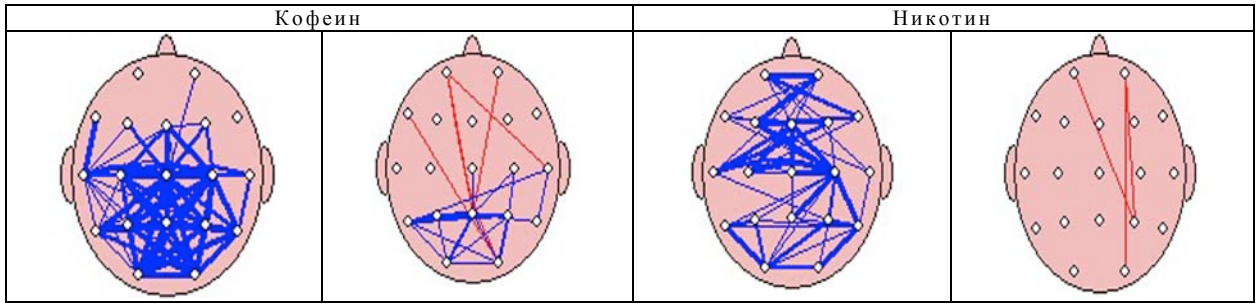
а *б*

Рис. 2. Пример оптимизации показателей альфа-ритма в результате применения нейрофидбэк-терапии: *а* – до терапии, *б* – после терапии



а *б*

Рис. 3. До терапия с магнием – повышенная амплитуда бета-ритма в лобной области **(***а*); после приема магния - нормализация амплитуды бета-ритма (*б*).
*результаты отражают сравнение с нормативной базой данных (www.appliedneuroscience)



а – до *б* – после *а* – до *б* – после

Рис. 4. Значительное снижение когерентности (темно-синий цвет) в периоде craving (*а*); после принятия стимуляторов когерентность является почти нормальной (б).
*результаты отражают сравнение с нормативной базой данных (www.appliedneuroscience)

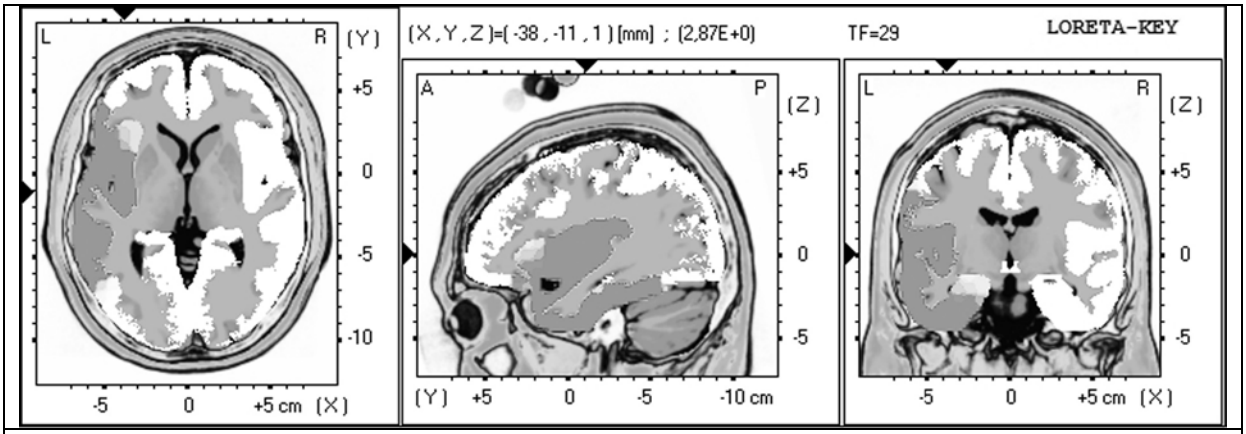


Рис. 5. Дисфункция в области левой инсулы, выраженная в бета-частотном диапазоне, в период менструального цикла у девочки с аутизмом.
*результаты отражают сравнение с нормативной базой данных (www.appliedneuroscience)

◆ *Обнаружение легкой черепно-мозговой травмы.* Это нарушение часто не диагностируется, что приводит к появлению осложнений, и ранняя диагностика может быть полезной для планирования различных терапевтических мероприятий.

Популярный инструмент на основе ЭЭГ: ЧМТ-индекс (AppliedNeuroscienceInc).

◆ *ЭЭГ как дополнительный инструмент для выявления факторов, имеющих негативное влияние на когнитивные функции.* ЭЭГ может быть использована в случаях с неустойчивостью когнитивных функций, причиной которых могут быть периодические влияния внешних или внутренних факторов.

На рис. 5 представлена ЭЭГ во время эпизодов с сенсорными нарушениями, обсессивно-компульсивным поведением и ухудшением когнитивных функций у 11-летней девочки с аутизмом, причем нарушения были связаны с гормональными изменениями. В этом случае ЭЭГ позволила провести различие между ухудшением ранее существовавших симптомов и проявлением вторичных факторов [6].

◆ *Сочетание ЭЭГ с методами транскраниальной стимуляции (tDCS, TMC) для оптимизации стимуляции.*

Комбинированное применение ЭЭГ с транскраниальной стимуляцией постоянным током (*tDCS – Transcranial direct current stimulation*) и транскраниальной магнитной стимуляцией (*TMC – Transcranial magnetic stimulation*), часто параллельно с навигационными техниками, позволяет получать оперативную информацию о влиянии стимуляции на мозговую деятельность: ЭЭГ обеспечивает максимальное временное разрешение, а навигационные инструменты отвечают за пространственное разрешение. Этот комбинированный подход полезен для обеих диагностических и лечебных процедур. Анализ ЭЭГ применяется для планирования процедуры стимуляции и мониторинга полученного эффекта.

Таким образом, ЭЭГ является относительно информативным и удобным методом, который может предоставить множество преимуществ для индивидуализации когнитивной нейротерапии и мониторинга ее эффективности.

Литература

1. *Arns M., Gunkelman J., Breteler M., Spronk D.*. EEG phenotypes predict treatment outcome to stimulants in children with ADHD // Journ. of Integrative Neuroscience. 2008 Sep. 7(3):421-38. PubMed PMID: 18988300.

2. *Velikova S., Chiarenza G.* EEG correlates of clinical subtypes of developmental dyslexia: Independent component analysis study // Intern. Journ. of Psychophysiology. 2012 Sep. 85:322.

3. *Penland J.G.* Quantitative analysis of EEG effects following experimental marginal magnesium and boron deprivation // Magnesium research : official organ of the International Society for the Development of Research on Magnesium. 1995 Dec. 8(4):341-58. PubMed PMID: 8861134.

4. *Yasuda H., Yasuda Y., Tsutsui T.* Estimation of autistic children by metallomics analysis. Scientific reports. 2013. 3:1199. PubMed PMID: 23383369. Pubmed Central PMCID: 3563033.

5. *Alper K.R., Chabot R.J., Kim A.H., Prichep L.S., John E.R.* Quantitative EEG correlates of crack cocaine dependence // Psychiatry research. 1990 Dec. 35(2):95-105. PubMed PMID: 2100807.

6. *Velikova S.* QEEG correlates of sensory craving episodes in a case of girl with autism: the role of female hormonal changes // IPEG 18th Biennial Conference. Leipzig, Germany, 2014.

Обнаружение «естественных» понятий

Е.Е. Витяев

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск

Что такое «естественная» классификация

Перед тем как перейти к «естественным» понятиям, надо понять, что такое «естественная» классификация. Фактически они говорят об одном и том же, только «естественная» классификация говорит о строении внешнего мира, на котором она основана, а «естественные» понятия, исследуемые в когнитивных науках, о восприятии «естественных» классов.

Первый достаточно подробный философский анализ «естественной» классификации принадлежит Дж. Ст. Миллю [15]. Приведем его точку зрения достаточно подробно, чтобы стал понятен смысл «естественной» классификации. Кроме того, проведенный Дж. Ст. Миллем анализ достаточно полон и на нем основано последующее изложение.

Сначала нужно отделить «искусственные» классификации от «естественных».

«Возьмем любой признак, и если одни вещи обладают им, а другие не обладают, то на нем можно основать деление всех вещей на два класса; и мы действительно так поступаем, когда создаем имя, означающее этот признак. Таким образом, число возможных классов беспредельно, и в действительности классов существует столько же, сколько есть общих имен. <…> Но если мы обратимся к… классу «животное» или «растение»… «белый» или «красный» и посмотрим, какими особенностями индивидуумы, обнимаемые данным классом, отличаются от индивидуумов, не входящих в него, то мы найдем, что в этом отношении одни классы сильно отличаются от других. Одни классы («белый» или «красный» – *прим. Е.Е.*) обнимают вещи, отличающиеся такими особенностями, которые можно перечислить, тогда как другие («животное» или «растение» – *прим. Е.Е.*) обладают столь большим количеством признаков, что их нельзя… перечислить… В некоторых классах мало или вовсе нет характеристических черт, кроме тех, которые означаются самим названием класса: белые вещи, например, не имеют никаких общих свойств, кроме белизны… Напротив, всех общих свойств животных или растений не могла исчерпать даже и целая сотня поколений… Отсюда видно, что свойства, которые мы полагаем в основу наших классов, иногда исчерпывают все общие признаки класса или в той или другой форме подразумевают их; в других случаях, напротив, мы отбираем немногие свойства не просто из большого, но из неисчерпаемого для нас числа их. <…> И вот именно те классы, которые отличаются неопределенным множеством свойств, а не только немногими определенными признаками, признавали родами и видами логики аристотелевской школы… в таком случае они признавали различие в разряде и называли его существенным отличием. <…> Общих свойств у всякого настоящего естественного разряда, а следовательно, и таких общих предложений, которые можно составить относительно этого разряда или которые, наверное, будут составляться впоследствии, по мере расширения нашего знания, – неопределенное и неисчерпаемое количество. А так как, согласно первому принципу естественной классификации, классы надо составлять так, чтобы образующие их предметы обладали наибольшим количеством общих свойств, то всякая такая классификация должна признавать и вбирать в себя все разрядовые различия, существующие между теми предметами, которые она должна классифицировать» [15].

Среди общих свойств естественного разряда есть как наблюдаемые, так и не наблюдаемые – скрытые признаки, которые являются, возможно, более важными. Чтобы учитывать скрытые признаки, надо находить их причинные проявления в наблюдаемых признаках. Дж. Ст. Милль по этому поводу пишет: «Таким образом, наши естественные группы часто должны основываться на неочевидных свойствах вещей, раз эти свойства важнее очевидных. Но в таких случаях необходимо должно быть некоторое другое свойство или ряд свойств, которые были бы более заметны для наблюдателя и сосуществовали бы в то же время со свойствами, на которых основана данная классификация, являясь их признаками. Так, например, естественная классификация животных должна основываться преимущественно на их внутреннем строении; однако было бы странно, как замечает О. Конт, если бы мы были в состоянии определить род и вид того или другого животного, только предварительно убив его. На этом основании предпочтения среди зоологических классификаций заслуживает, вероятно, классификация де Блэнвиля, основанная на различиях во внешних покровах животных» [15].

Таким образом, «естественную» классификацию Дж. Ст. Милль определяет следующим образом: «Всего более соответствует целям научной (естественной) классификации, когда предметы соединяются в такие группы, относительно которых можно высказать наибольшее число общих предложений… предметы следовало бы классифицировать по возможности на основании таких свойств, которые служат причинами многих других или, по крайней мере, составляют их верные признаки. Из этих последних надо выбирать такие, которые были бы самыми надежными и наиболее непосредственными признаками… Но, к

сожалению, свойства, служащие причинами главных отличительных признаков классов, редко бывают в то же время способны служить для узнавания этого класса. И вместо причин нам по большей части приходится выбирать те или другие из наиболее бросающихся в глаза их следствий – такие следствия, которые могут служить признаками как других следствий, так и самой причины» [15].

На основании понятия «естественного» класса Дж. Ст. Милль определяет также понятие «образа» класса, которое является предтечей «естественных» понятий, возникающих в когнитивной психологии и рассмотренных далее.

«Естественные группы не только не менее всяких искусственных классов определяются признаками, но образуются именно ввиду и на основании признаков. Однако при этом принимаются во внимание не только признаки, безусловно общие для всех включаемых в группу предметов, но вся совокупность тех признаков, из которых все встречаются в большинстве этих предметов, а большинство – во всех. Вследствие этого наше понятие о классе – тот образ, которым этот класс представлен в нашем уме, – есть понятие о некотором образце, обладающем всеми признаками данного класса, естественнее же всего о таком образце, который, обладая всеми этими признаками в самой высокой степени, в какой они когда-либо встречаются, вследствие этого всего яснее и резче может указать нам, в чем состоят эти признаки. К этому-то мерилу – не вместо определения, а в пояснение его – мы обыкновенно и с удобством обращаемся с целью определить, принадлежит ли тот или другой индивидуум или вид к данному классу или нет» [15].

Рассуждения Дж. Ст. Милля были подтверждены естествоиспытателями, строившими «естественные» классификации. Например, В. Уэвель пишет, что в «естественных» классах мы можем сделать наибольшее число общих предложений: «Чем больше общих утверждений об объектах дает возможность сделать классификация, тем она естественней» [7]. О неисчерпаемом количестве общих свойств у «естественных» классов пишет Л. Рутковский: «Чем в большем числе существенных признаков сходны сравниваемые предметы, тем вероятнее их одинаковость и в других отношениях» [9]. Аналогичное высказывание делает Е.С. Смирнов: «Таксономическая проблема заключается в “индикации”: от бесконечно большого числа признаков нам нужно перейти к ограниченному их количеству, которое заменило бы все остальные признаки» [10].

В результате была сформулирована проблема определения «естественных» классификаций, которая до сих пор обсуждается в литературе [5, 6, 8, 11, 12, 22]. Однако, с нашей точки зрения, до сих пор нет достаточно адекватного формального определения «естественной» классификации.

Принципы категоризации в когнитивных науках

В работах Э. Рош [16–20] на основании проведенных экспериментов сформулированы принципы категоризации «естественных» категорий, подтверждающие высказывания Дж. Ст. Милля и естествоиспытателей.

Первый принцип – «когнитивной экономии» – состоит в том, что организм хочет получить от категорий как можно больше информации об окружении, используя как можно меньше ресурсов. С одной стороны, это позволяет предсказывать как можно больше свойств по отдельным свойствам, а с другой стороны, формировать большое число категорий с наилучшим разделением между собой.

Второй принцип – «структурности воспринимаемого мира» – дополняет первый и состоит в том, что воспринимаемый мир не является неструктурированным множеством равновероятно встречающихся свойств, наоборот, объекты воспринимаемого мира имеют высоко коррелированную структуру. При этом надо иметь в виду, что речь идет о воспринимаемом мире, а не о метафизическом мире «в себе». Собака и человек видят мир по-разному.

Понятно, что первый принцип не возможен без второго – когнитивная экономия не возможна без структурированности мира.

Непосредственно воспринимаемые объекты (basic objects) – информационно богатые связки наблюдаемых и функциональных свойств, которые образуют естественную разрывность, создающую категоризацию. Эти связки формируют «прототипы» объектов классов (образец у Дж. Ст. Милля).

«Categories can be viewed in terms of their clear cases if the perceiver places emphasis on the correlational structure of perceived attributes… By prototypes of categories we have generally meant the clearest cases of category membership» [19, 20]. «Rosch and Mervis (1975) have shown that the more prototypical of a category a member is rated, the more attributes it has in common with other members of the category and the fewer attributes in common with members of the contrasting categories» [17–18].

В дальнейшем теория «естественных» понятий Э. Рош получила название прототипической теории понятий (prototype theory). Основные ее черты описываются следующим образом: «прототипическая точка зрения придерживается предположения, что есть некоторое общее множество свойств членов категории, не предполагающее, что все члены категории обладают всеми этими свойствами. Наоборот, предполагается вероятностный процесс сходства: члены категории имеют больше общих свойств, возможно взвешенных по важности, с прототипом данной категории, чем с прототипами других категорий» [21].

К сожалению, в такой формулировке исчезают принципы категоризации, сформулированные Э. Рош, говорящие об отражении в «естественных» понятиях высококоррелированной структуры внешнего мира.

Выдвинутые затем математические модели формирования понятий, основанные на таком понимании прототипической теории, также не отражают высококоррелированную структуру мира.

Формализация «естественных» классификаций и «естественных» категорий

Предлагаемая нами формализация «естественных» классификаций и «естественных» категорий прямо основана на высокой коррелированности структуры внешнего мира. Более того, основным предположением и механизмом построения «естественной» классификации является обнаружение всех возможных причинных связей, вытекающих из этой коррелированности [1]. Тогда, если обнаружение причинных связей формализовать специальным семантическим вероятностным выводом и представить набором правил, а высококоррелированную структуру – замыканием всех предсказаний, осуществляемых этими причинными связями, на себя, то получатся неподвижные точки предсказаний, формирующие прототипы «естественных» классов.

Математический аппарат неподвижных точек предсказаний по причинным связям основан на следующих новых и нетривиальных математических результатах:

1) семантический вероятностный вывод, обнаруживающий причинные связи, решает также проблему статистической двусмысленности – нами доказано, что он обнаруживает максимально специфические причинные правила, предсказывающие без противоречий [2, 24];

2) семантический вероятностный вывод может быть представлен как формальная модель нейрона, а неподвижные точки, как клеточные ансамбли [25];

3) неподвижные точки являются вероятностным обобщением формальных понятий [3, 13, 26], исследуемых в анализе формальных понятий [14];

4) можно доказать, что неподвижные точки предсказаний для правил с отрицанием логически непротиворечивы [4, 27].

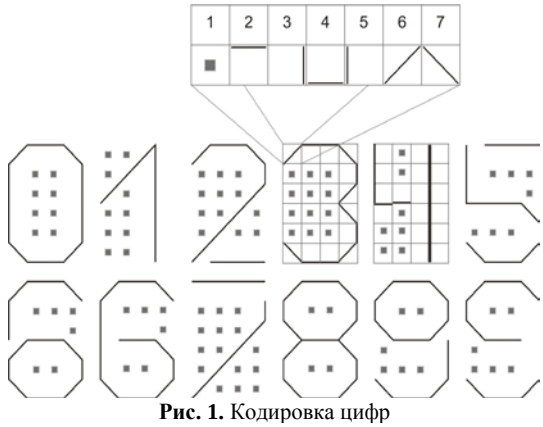


Рис. 1. Кодировка цифр

Проиллюстрируем неподвижные точки компьютерным экспериментом по формированию «естественных» классов и понятий закодированных цифр.

Закодируем цифры, как показано на рис. 1. Сформируем обучающее множество, состоящее из 360 перетасованных цифр (12 цифр рис. 1 продублированных в 30 экземплярах без указания, где какая цифра). На этом множестве семантическим вероятностным выводом обнаружено 55089 закономерностей – общих утверждений об объектах, о которых говорит Дж. Ст. Милль и В. Уэвель.

По этим закономерностям обнаружено ровно 12 неподвижных точек, которые в точности соответствуют нашим цифрам, хотя алгоритму ничего не известно о содержании объектов, кроме значений признаков.

Пример неподвижной точки для цифры 6 приведен на рис. 2. Рассмотрим, что представляет собой неподвижная точка. Пронумеруем признаки цифр, как указано в таблице.

Кодировка полей цифр

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16
17	18	19	20
21	22	23	24

Первая закономерность цифры 6 рис. 2, представленная в первом прямоугольнике после фигурной скобки, говорит, что, если в квадрате 13 (табл.) стоит признак 6 (обозначим это как 13-6), то в квадрате 3 должен стоять признак 2 (обозначим как 3-2). Предсказываемый признак обозначается точечной линией. Запишем эту закономерность как 13-6 $\Rightarrow$ 3-2. Нетрудно проверить по цифрам, что эта закономерность действительно выполнена на всех цифрах. Вторая закономерность говорит, что из признака 9-5 и отрицания значения 5 первого признака $\neg$1-5 (первый признак не должен быть равен 5) следует признак 4-7.

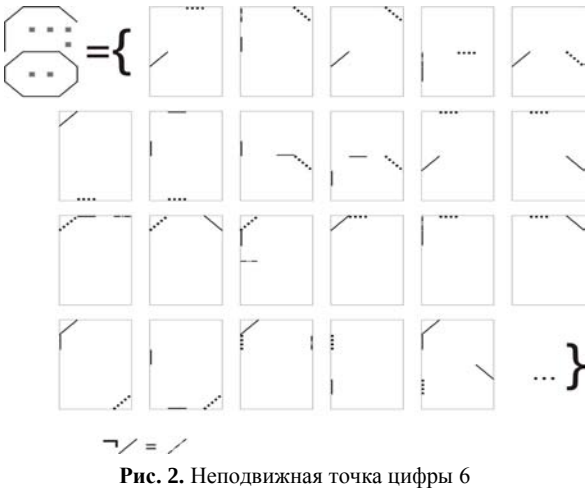


Рис. 2. Неподвижная точка цифры 6

Отрицание значения некоторого признака обозначается пунктирной линией, как показано в нижней части рис. 2. В результате получаем закономерность 9-5&¬(1-5) ⇒ 4-7. Последующие 3 закономерности в первой строке цифры 6 на рис. 2 будут соответственно закономерности (13-6 ⇒ 4-7), (17-5&¬(13-5) ⇒ 4-7), (13-6 ⇒ 16-7).

На рис. 2 видно, что закономерности и признаки цифры 6 образуют неподвижную точку – взаимно предсказывают друг друга, замыкая взаимные предсказания признаков на себя. Заметим, что при этом закономерности, используемые в неподвижной точке, выполнены на всех цифрах, а сама неподвижная точка выделяет только одну цифру. Поэтому цифры выделяются не закономерностями самими по себе, а их взаимосвязью.

Неподвижная точка автоматически обнаруживает паттерн – набор признаков, составляющий неподвижную точку, который является прототипом у Э. Рош и образом у Дж. Ст. Милля. Программа не знает заранее, какие сочетания признаков максимально коррелируют между собой (взаимно предсказываются причинными связями) и составляют паттерн.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-07-03410-а.

Литература

1. *Витяев Е.Е.* Классификация как выделение групп объектов, удовлетворяющих разным множествам согласованных закономерностей // Анализ разнотипных данных. Новосибирск, 1983. С. 44–50. (Выч. сист. ; вып. 99).

2. *Витяев Е.Е.* Извлечение знаний из данных. Компьютерное познание. Модели когнитивных процессов. Новосибирск : НГУ, 2006. С. 293.

3. *Витяев Е.Е., Демин А.В., Пономарёв Д.К.* Вероятностное обобщение формальных понятий // Программирование. 2012. Т. 38, № 5. С. 219–230.

4. *Витяев Е.Е., Мартынович В.В.* Вероятностные формальные понятия на контекстах с отрицаниями // Информационные технологии в гуманитарных исследованиях. Новосибирск, 2014. Вып. 19. С. 5–20.

5. *Забродин В.Ю.* О критериях естественной классификации // НТИ. Сер. 2. 1981. № 8.

6. *Кожара В.Л.* Функции классификации // Теория классификаций и анализ данных. Новосибирск, 1982.

7. *Мейен С.В., Шрейдер С.А.* Методологические аспекты теории классификаций // Вопросы философии. 1976. № 12.

8. *Розова С.С.* Классификационная проблема в современной науке. Новосибирск : Наука, 1986. 224 с.

9. *Рутковский Л.* Элементарный учебник логики. СПб, 1884.

10.*Смирнов Е.С.* Конструкция вида таксономической точки зрения // Зоол. журн. 1938. Т. 17, № 3. С. 387–418.

11.*Субботин А.Л.* Классификация. М. : ИФ РАН, 2001.

12.*Шрейдер С.А.* Систематика, типологии, классификация // Теория и методология биологических классификаций. М. : Наука, 1983.

13.*Demin A., Ponomarev D., Vityaev E.* Probabilistic Concepts in Formal Contexts // Preliminary Proceedings of the Ershov Informatics Conference PSI Series, 8-th Edition (June 27 – July 1, 2011, Novosibirsk), Novosibirsk, 2011. P. 29–38.

14.*Ganter B.* Formal Concept Analysis: Methods, and Applications in Computer Science. TU Dresden, Germany, 2003.

15.*Mill J.S.* System of Logic, Ratiocinative and Inductive. L., 1983.

16.*Rosch E.H.* Natural categories // Cognitive Psychology. 1973. V. 4, Is. 3. P. 328–350.

17.*Rosch E., Mervis C.B.* Family resemblances. Studies in the internal structure of categories // Cognitive Psychology. 1975. V. 7, Is. 4. P. 573–605.

18.*Rosch E., Mervis C. B., Gray W.D., Johnson D.M., Boyes-Braem P.* Basic objects in natural categories // Cognitive Psychology. 1976. V. 8. P. 382–439.

19.*Rosch E., Lloyd B.B.* (*eds*) Cognition and categorization. Hillsdale, N.J. : Lawrence Erlbaum, 1978, P. 27–48.

20.*Rosch E.* Principles of Categorization // Rosch E., Lloyd, B.B. (eds) Cognition and Categorization. Lawrence Erlbaum Associates, 1978. P. 27–48.

21.*Ross B.H., Taylor E.G., Middleton E.L., Nokes T.J.* Concept and Category Learning in Humans // Learning and Memory: A Comprehensive Reference. V. 2 : Cognitive Psychology of Memory. Oxford : Elsevier, 2008. P. 535–556.

22.Scientific Discovery / website. URL: http://math.nsc.ru/AP/ScientificDiscovery/

23.The Nature of Classification : Relationships and Kinds in the Natural Sciences. Palgrave Macmillan, 2013. 208 p.

24.*Vityaev E.* The logic of prediction // Mathematical Logic in Asia : Proceedings of the 9th Asian Logic Conference / edited by S.S. Goncharov, R. Downey, H. Ono. Singapore : World Scientific, 2006. P. 263–276.

25.*Vityaev E.E.* A formal model of neuron that provides consistent predictions // Biologically Inspired Cognitive Architectures 2012 : Proceedings of the Third Annual Meeting of the BICA Society. Heidelberg : New York ; Dordrecht ; London : Springer, 2013. P. 339–344. (Advances in Intelligent Systems and Computing. V. 196).

26.*Vityaev E.E., Demin A.V., Ponomaryov D.K.* Probabilistic Generalization of Formal Concepts // Programming and Computer Software. 2012. V. 38, № 5. P. 219–230.

27.*Vityaev E.E., Martinovich V.V.* Probabilistic Formal Concepts with Negation // Perspectives of System Informatics. 2015. P. 385–399. (Lecture Notes in Computer Science ; vol. 8974). DOI: 10.1007/978-3-662-46823-4_31.

Хаотическая динамика параметров электроэнцефалограмм

Ю.В. Вохмина, В.В. Еськов, Д.В. Горбунов, Г.А. Шадрин

Сургутский государственный университет

При изучении электроэнцефалограмм (ЭЭГ) в клинической медицине обычно используются параметры амплитудно-частотных характеристик регистрируемых биопотенциалов. Однако мы доказываем в рамках теории хаоса-самоорганизации сугубо хаотический характер ЭЭГ, который проявляется в автокорреляционных функциях *A(t)* и функциях распределения *f(x)*. В этой связи возможны два новых подхода в оценке параметров электроэнцефалограмм. Первый из них основан на построении матриц парных сравнений регистрируемых выборок биопотенциалов мозга у испытуемых, находящихся в разных физиологических (психических) состояниях: с фотостимуляцией и без нее. Второй метод базируется на расчетах параметров квазиаттракторов, которые на плоскости строятся в координатах $x_1 = U(t)$ – функция изменения биопотенциала в точке регистрации и $x_2 = dx_1/dt$ – скорость этого изменения x_1. Квазиаттракторы в таком двумерном фазовом пространстве состояний (ФПС) количественно различаются по параметрам для больных (эпилепсия) и здоровых испытуемых. Возможна и трехмерная ($x_3 = dx_2/dt$) модель квазиаттрактора в фазовом пространстве состояний. В целом, для анализа ЭЭГ целесообразно использовать и стохастические расчеты, и параметры квазиаттракторов при оценке нормы или патологии. Показывается неэффективность расчета параметров энтропии Шеннона при моделировании ЭЭГ.

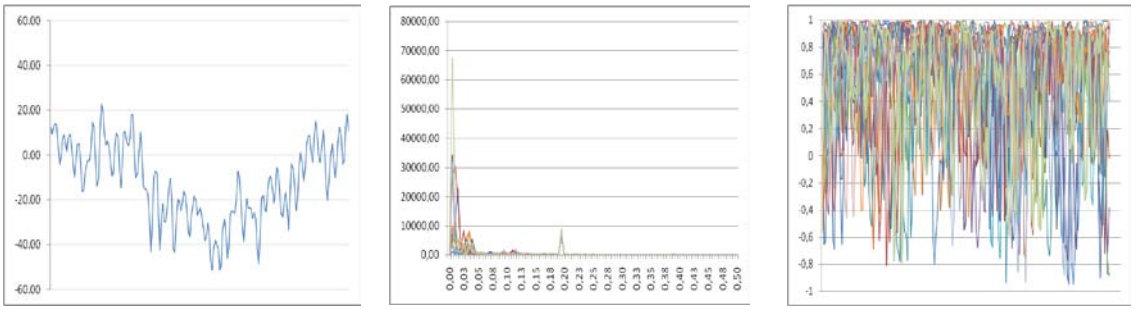
1. Динамика ЭЭГ представляет типичные хаотические параметры гомеостаза

Традиционное использование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) в клинической электроэнцефалографии имеет определенные недостатки в связи с непрерывным изменением спектра ЭЭГ. Более того, другие статистические характеристики в виде автокорреляционных функций *A(t)* и функций распределения *f(x)* также весьма изменчивы. Ниже будет показано, что функции распределения *f(x)* и атокорреляционные функции *A(t)* демонстрирует непрерывный хаотический калейдоскоп изменений своих значений для любых динамик биопотенциалов и особенно для ЭЭГ и электромиограмм (ЭМГ).

Рассматриваемые динамики изменения биопотенциалов мозга (в виде ЭЭГ) обычно представляют как суперпозиции хаотических процессов активности многих нейронов. Эти суперпозиции хаотически создает суммарную биоэлектрическую активность не только мозга, но и мышц, нейрограмм и т. д., но при этом хаос ЭЭГ не является динамичным хаосом Арнольда – Тома. Суперпозиция регистрируется как интегральная суммарную активность, которая хаотически изменяет свою характеристику в виде *A(t)* и АЧХ. Из-за отсутствия жесткой синхронизации ее можно считать хаотической функцией, которая в рамках нового подхода расчета параметров квазиаттракторов вектора состояния системы (ВСС) не может быть представлена функциями распределения *f(x)* или как детерминированный хаос. Генерация биопотенциалов мозга дает некоторую закономерность именно в рамках параметров квазиаттракторов, так как основные стохастические функции демонстрируют непрерывные изменения [1, 3]. Возникает главный вопрос о целесообразности использования стохастики в описании ЭЭГ. Можно ли при этом предложить другие подходы, если статистические функции *f(x)* непрерывно меняются от выборки к выборке [1, 3]?

Дискуссия о сложности и повторяемости любых биопотенциалов (и в этом числе ЭЭГ, ЭМГ, нейрограмм и т. д.) в описании гомеостаза усиливает актуальность этой проблемы. Мы сейчас говорим о подобии динамик миограмм, кардиоритмов, треморограмм и ЭЭГ между собой с позиций стохастики. Для иллюстрации этого утверждения мы приводим рис. 1 с примерами реальных (нативных) динамик (I), АЧХ (II) и их функций *A(t)* (III) для ЭЭГ.

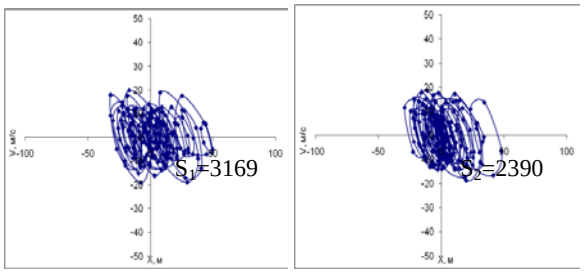
В случае с ЭЭГ (см. рис. 1) для нормогенеза наблюдается все-таки чисто хаотическая динамика, которая существенно не отличается от динамики кардиоинтервалов, миограмм и многих других динамичных процессов в организме (например, биохимических параметров гомеостаза). При возникновении управляемых режимов организм переходит от хаоса к некоторому неравномерному распределению, т.е. свойство перемешивания не выполняется и распределение становится неравномерным. Но при этом невозможно удержать выборки в пределах одной *f(x)*, т. е. мы имеем дело с постоянно изменяемым видом *f(x)* (см. рис. 2) [1–2]. Нечто подобное происходит и с треморограммами, кардиоинтервалами и т.д. В норме постуральный тремор (физиологический) дает хаотические квазиаттракторы (КА) почти сплошь заполняющие ограниченный объем *V* (объем квазиаттрактора). При возникновении болезни Паркинсона тремор дает нам некоторые регулярные частоты и распределение значений на фазовой плоскости становится неравномерным. Имеется сходная динамика и при работе сердца. Например, перед смертью в ряде случаев сердце начинает биться с весьма устойчивой частотой. В целом остается один почти устойчивый генератор ритмики и при эпилепсии, и при треморе болезни Паркинсона, и в работе сердца перед летальным исходом. Регуляризация динамики на фазовой плоскости, т.е. переход от хаоса к доминантным частотам, очень выразительно просматривается



I II III

Рис. 1. Примеры динамик электроэнцефалограммы (I), а также суперпозиция их 15 амплитудно-частотных характеристик (II) и суперпозиции их 15 автокорреляционных функций *A(t)* (III)

в виде определенных фигур на фазовой плоскости. При этом фактическая площадь квазиаттракторов закономерно изменяется, и они (квазиаттракторы) принимают характерную форму (рис. 3) [1–3, 5].

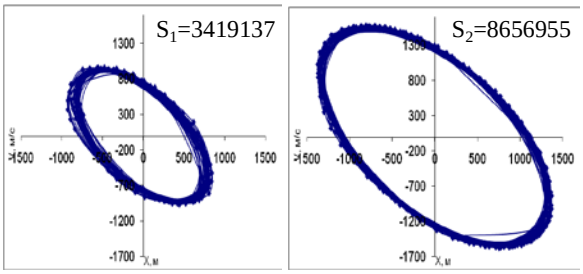


а *б*

Рис. 2. Фазовые портреты движения вектора состояния $(x = (x_1, x_2)^T)$ ЭЭГ условно здорового испытуемого в период: *а* – релаксации (спокойное состояние) площадь квазиаттрактора $S_1 = 3169$; *б* – при фотостимуляции $S_2 = 2585$, где по оси абсцисс откладываются величины измеряемых биопотенциалов x_1 (в мкВ), а по оси ординат – скорости изменения этих же биопотенциалов $(x_2 = dx/dt)$ в отведении T6-Ref

На рис. 3 представлен фазовый портрет человека с очаговой эпилепсией без внешних воздействий (стимулов, т. е. спокойное состояние) и фазовый портрет этого же пациента в условиях фотостимуляции (наблюдается навязывание внешнего ритма). Легко видеть, что уже существующая неравномерность распределения в фазовом портрете резко усиливается при фотостимуляции. Количественно это проявляется в изменении площади квазиаттрактора. Например, при внешнем возмущении наблюдается увеличение площади общего квазиаттрактора от $S_1 = 3423789$ до $S_2 = 8700052$. Такая динамика резко отличается от рис. 2 для нормогенеза, где $S_2 < S_1$ [2, 3–5].

В терминах квазиаттракторов нормогенез в сравнении с патогенезом соответствует более равномерному (хаотическому) распределению параметров ВСС в ФПС, что можно наблюдать при сравнении рис. 2 и 3. При возникновении патологии распределение ВСС становится выраженно неравномерным, возникают доминанты патологий, что соответствует неравномерному (в виде тора в 3-мерном ФПС) распределению ВСС в ФПС. На рис. 2 представлены примеры КА условно здорового человека без фотостимуляции (*а*) и при фотостимуляции (*б*).



а *б*

Рис. 3. Фазовые портреты движения вектора состояния $(x = (x_1, x_2)^T)$ ЭЭГ испытуемого с эпилепсией в период релаксации (спокойное состояние) S_1=3419137 (*а*) и при фотостимуляции $S_2 = 8656955$ (*б*), где по оси абсцисс откладываются величины измеряемых биопотенциалов x_1 (в мкВ), а по оси ординат – скорости изменения этих же биопотенциалов $(x_2 = dx/dt)$ в отведении T4-T6.

2. Энтропия и квазиаттракторы для ЭЭГ

Анализ матриц парного сравнения выборок ЭЭГ позволяет сделать вывод, что у человека, больного эпилепсией, и без фотостимуляции уже имеется большое количество совпадений ($k = 103$), а при фотостимуляции число совпадений несколько увеличивается ($k = 104$). Это связано с возникновением в головном мозге патологических разрядов, они проявляются как временные нарушения мыслительных, вегетативных, чувствительных и двигательных функций. У здорового же человека число совпадений в период релаксации $k = 33$, а в период фотостимуляции $k = 37$, т. е. тоже увеличивается, но на более существенную величину (на 12 %) в сравнении с патологией [2–4].

Одновременно мы проверили значимость и эффективность критерия термодинамического типа, который используется в стохастике (и термодинамике) в виде расчета энтропии Шеннона E для этих же выборок ЭЭГ для здорового человека и человека, больного эпилепсией (табл. 1). Результаты расчетов энтропии E для здорового и больного эпилепсией человека показали, что распределения E_1 (в период релаксации) и E_2 (в период фотостимуляции) будут непараметрическими. Для здорового имеем $<E_1> = 3{,}189$, $<E_2> = 3{,}189$. Различие этих выборок по критерию Вилкоксона ($p = 0{,}87$) значительно больше 0,05. Отсутствие статистических различий в выборках E мы получили и для выборок ЭЭГ для человека больного эпилепсией. Для больного мы имеем параметрическое распределение для E_1 и E_2, при среднем

значении $<E_1>$=2,883, $<E_2>$=2,825. В целом полученные результаты значений энтропии статистически не различаются при $p < 0,05$ для двух пар выборок E_1 и E_2 (в виде $p = 0,87$ для здорового испытуемого и в виде $p = 0,66$ для больного эпилепсией). Можно утверждать, что энтропия не является параметром сравнения ЭЭГ для пациента при фотостимуляции. Можно только различать параметры E здорового и больного испытуемого.

Таблица 1

Значения энтропии Шеннона для выборок ЭЭГ человека больного эпилепсией в период релаксации и фотостимуляции

Номер измерения	Человек, больной эпилепсией, Т4-Т6	
	E_1 в период релаксации	E_2 в период фотостимуляции
1	3,122	2,846
2	3,122	2,522
3	3,122	2,446
4	3,322	2,722
5	2,722	3,322
6	2,371	2,922
7	2,446	3,322
8	2,446	3,122
9	2,922	2,846
10	2,922	2,722
11	2,922	2,446
12	3,122	2,646
13	2,922	2,922
14	2,846	2,646
15	2,922	2,922
<E>	2,883	2,825
	T-критерий, значимость различий выборок *f(x)*: $p = 0,66$	

Для больного ни функции *f(x)*, которые непрерывно изменяются, ни термодинамический (энтропийный) подход в оценке выборок ЭЭГ (для биопотенциалов мозга) в двух состояниях испытуемых не дают существенных различий и не являются динамическими признаками. Получается, что ЭЭГ одинаковы в этих двух состояниях, хотя матрицы парных сравнений выборок все-таки показывают разное число совпадений как для здорового человека ($k_1 = 33$, $k_2 = 37$), так и для человека, больного эпилепсией ($k_1 = 103$, $k_2 = 104$). С позиций расчета энтропии биопотенциалы мозга (ЭЭГ) не изменяются. Получается, что испытуемый как бы находится в стационарном состоянии, хотя с позиции квазиаттракторов и АЧХ различия существенные [2, 3, 5].

Заключение

1. Анализ ЭЭГ в норме и при патологии (эпилепсии) с позиции стохастики доказывает, что АЧХ для ЭЭГ носят все-таки хаотический характер, который имеет место и для автокорреляционных функций *A(t)*. Отсюда следствие – традиционная стохастика в описании ЭЭГ имеет низкую эффективность.

2. На основе анализа объемов квазиаттракторов (КА) V_G можно сделать вывод, что у здорового человека при фотостимуляции объемы V_G уменьшаются, а у больного эпилепсией V_G увеличивается и скорость изменения КА будет положительной.

3. На основе метода построения матриц парных сравнений регистрируемых выборок биопотенциалов мозга показано, что у больного эпилепсией уже изначально имеется большое количество «совпадений» пар выборок ЭЭГ в период релаксации (k = 103, против 33 у здорового), а в период фотостимуляции оно незначительно возрастает (до k = 104).

Литература

1. *Ведясова О.А., Еськов В.М., Живогляд Р.Н., Зуевская Т.В., Попов Ю.М.* Соотношение между детерминистскими и хаотическими подходами в моделировании синергизма и устойчивости работы дыхательного центра млекопитающих.// Вестник новых медицинских технологий. 2005. Т. 12, № 2. С. 23–24.

2. *Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е.* Способ корректировки лечебного или лечебно-оздоровительного воздействия на пациента: патент на изобретение RUS 2433788 от 01.02.2010 г.

3. *Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Зимин М.И.* Неопределенность в квантовой механике и биофизике сложных систем // Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2014. № 5. С. 41–46.

4. *Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вахмина Ю.В.* Кинематика биосистем как эволюция: стационарные режимы и скорость движения сложных систем – complexity // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2015. № 2. С. 62–73.

5. *Eskov V.M.* Evolution of the emergent properties of three types of societies: the basic law of human development // Emergence: Complexity & Organization. 2014. V. 16 (2). P. 109–117.

Информационная модель слухового восприятия

В.Е. Гай, В.А. Утробин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Создание принципиально новых и эффективных методов обработки сигналов невозможно без исследования информационных процессов, протекающих в сенсорных системах. Данный тезис высказан в работе Д. Марра [1], посвятившего свою книгу описанию методов обработки изображений, основанных на процессах преобразования информации в зрительной системе.

Известны методы обработки речевых сигналов, которые используют особенности слуховой системы человека. Например, мел-шкала моделирует частотную чувствительность слуха.

В ряде случаев методы обработки речи, основанные на имеющейся информации о слуховой системе, достаточно успешны. Однако, несмотря на большое количество исследований, касающихся физиологии слуха, до сих пор не создана теория, описывающая модель слухового восприятия.

Известна информационная модель зрительного восприятия, описанная в теории активного восприятия. На основе данной теории разработаны эффективные методы распознавания и поиска изображений.

В данной работе рассматриваются вопросы использования теории активного восприятия для моделирования процессов слухового восприятия.

1. Известные модели системы слухового восприятия

Рассмотрим некоторые модели периферийного отдела слуховой системы. Модель Н.В. Позина описывает, в виде аналогового устройства, преобразования сигналов, выполняемые в среднем и внутреннем ухе [2]. Среднее ухо моделируется фильтром низких частот, а основная мембрана представлена в виде набора частоточувствительных элементов, расположенных вдоль оси частот. В работах Л.А. Чистович рассматривается модель обработки амплитудной огибающей в частотных каналах слухового спектрального анализатора (модель обнаружения амплитудных неравномерностей) [3].

2. Предлагаемая модель системы слухового восприятия

Принимая во внимание описанные модели, в рамках ТАВ мембрану улитки внутреннего уха можно смоделировать с помощью *U*-преобразования, т. е. с помощью двух преобразований: интегрирования (*Q*-преобразование) и дифференцирования [4].

Полным и замкнутым группам можно поставить в соответствие клетки, входящие в различные подотделы кохлеарных ядер, так как их структура подключения к слуховому нерву подобна структуре подключения полных и замкнутых групп к операторам (рис. 1).

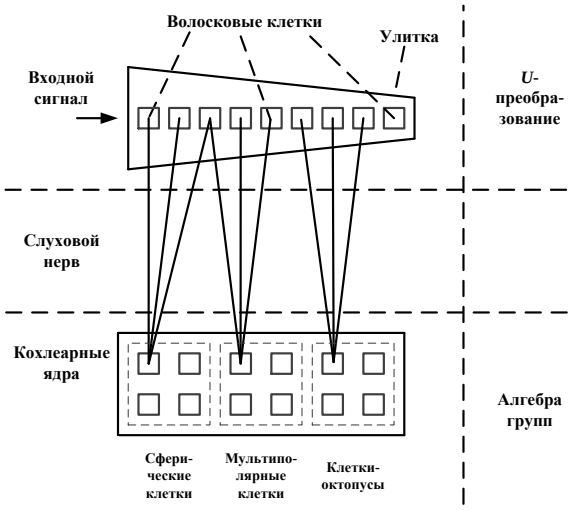


Рис. 1. Информационная модель слухового восприятия

3. Реализация системы распознавания с позиций ТАВ

3.1. Предварительная обработка сигнала

Предварительная обработка сигнала с позиций теории активного восприятия заключается в выполнении операции интегрирования. На данном этапе обработки анализируемый сигнал разбивается на сегменты, по каждому из которых вычисляется *Q*-преобразование:

$$g(i) = Q[\, h_i \,],\ g_i = \sum_{k=1}^{L} h_i(k),$$

где $i = \overline{1, N}$, N – число отсчетов в сигнале g, $\mathbf{h} = \{h_i\}$, $\mathbf{h}$ – множество сегментов, вычисленных по сигналу f, L – количество отсчетов в сегменте.

Таким образом, на следующий этап, этап вычисления признаков, передается сигнал g.

3.2. Формирование признакового описания

Рассмотрим метод, предлагаемый для создания признакового описания сигнала g.

1) Отсчеты сигнала g разбиваются на множество сегментов $\mathbf{g} = \{g_k\}$ длиной 16 отсчетов, со смещением в S отсчетов.

2) К каждому сегменту g_k применяется *U*-преобразование (*U*-преобразование является базовым в теории активного восприятия), в результате формируется спектральное представление каждого сегмента: $u_k = U[\, g_k \,]$, $\mathbf{u} = \{\, u_k \,\}$, где U – оператор вычисления *U*-преобразования.

3) По вычисленному спектральному представлению u_k сегмента g_k формируется описание с помощью одной или нескольких структур, входящих в алгебру групп. В алгебре групп существуют следующие структуры, которые могут использоваться для создания описания:

а) операторы (V, значимыми являются 15 элементов из 16, учитывая, что каждый элемент может принимать значения 0 и 1, пространство признаков на основе операторов включает 30 элементов);

б) полные группы (P_{ni}), полные группы на операции умножения (P_{nim}, 140 элементов), полные группы на операции сложения (P_{nia}, 140 элементов);

в) замкнутые группы (P_{si}, 840 элементов), замкнутые множества (P_{ci}, 840 элементов).

Допустимо использование сочетаний данных структур.

4) Для объединения данных, полученных от разных сегментов анализируемого сигнала, вычисляется гистограмма элементов структур, использованных при создании описания сегмента.

Таким образом, гистограмма используется для объединения результатов вычисления признаков от нескольких сегментов, т. е. это позволяет получить представление о сигнале в целом.

3.3. Принятие решения

Этап классификации может быть реализован с помощью нескольких классификаторов. Например, с помощью метрического метода классификации k ближайших соседей или линейного метода опорных векторов.

4. Вычислительный эксперимент

4.1. Описание базы данных

Тестирование предложенной системы признаков будет выполняться на основе базы данных эмоциональной речи EmoDB [5].

База данных содержит записи голоса 10 дикторов (профессиональных актеров, 5 мужчин, 5 женщин), которые выражают следующие эмоции: злость, скука, отвращение, страх (тревога), счастье, печаль, нейтральное состояние.

4.2. Известные результаты

Рассмотрим результаты точности классификации на основе известных методов. В работе [6] решается задача дикторозависимой классификации эмоций, используются признаки, вычисляемые на основе частоты основного тона, энергии сигнала: классификатор – скрытая марковская модель. Достигнутая точность классификации составляет 80 %. В работе [7] решается задача дикторонезависимой классификации эмоций, используются признаки, вычисляемые на основе пакетного вейвлет разложения, классификатор: линейный метод опорных векторов. Достигнутая точность классификации составляет 79,5 %. В работе [8] решается задача дикторонезависимой классификации эмоций, для описания сигнала используются гармонические признаки, для моделирования данных используется гауссова смесь, классификатор – метод наибольшего правдоподобия. Достигнутая точность классификации составляет 7,5 %.

4.3. Результаты тестирования предложенного метода

Вычислительный эксперимент заключается в проверке точности идентификации эмоционального состояния диктора на основе предложенной системы признаков с использованием метода опорных векторов. Известно, что человек может оценить эмоциональное состояние другого человека только после достаточно длительного общения с ним. Поэтому в работе предполагается, что для устойчивой классификации эмоционального состояния нужно для каждого пользователя системы (диспетчера) создать собственную модель. Приводятся также результаты вычислительного эксперимента для дикторонезависимого подхода к распознаванию эмоций. Вычислительный эксперимент выполнялся на основе метода перекрестной проверки (данные разбивались на 10 частей). В качестве системы признаков используется одномерная гистограмма замкнутых групп.

В табл. 1 приведена оценка точности классификации для различных параметров алгоритма классификации (дикторозависимая классификация).

Таблица 1

Точность классификации
(1-N, нормализация признаков)

Диктор / Параметры (L / S)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 / 1	76	85	86	81	77	84	77	86	84	95
1 / 2	74	76	88	81	74	78	79	85	84	92
1 / 4	74	73	83	84	78	78	74	78	81	88
1 / 8	62	77	82	73	71	84	76	78	78	90
2 / 1	81	84	86	80	83	84	79	85	81	85
2 / 2	77	79	83	83	83	88	80	84	85	87
2 / 4	76	73	88	81	77	89	79	83	77	82
2 / 8	72	67	82	77	79	84	81	85	79	83
4 / 1	86	79	88	80	80	87	83	78	92	92
4 / 2	86	78	86	80	79	89	86	79	89	90
4 / 4	84	80	88	73	77	87	88	79	89	90
4 / 8	82	78	91	73	78	89	87	82	86	88

В табл. 2 приведены результаты оценки точности классификации, полученные при решении задачи дикторонезависимой классификации эмоционального состояния.

Таблица 2

Точность классификации

Параметры (L / S) / Метод класиф.	1/1	1/4	1/8	2/1	2/4	2/8	4/1	4/4	4/8
1-1, SVM нормализ.	67	61	57	69	65	60	79	67	64
1-*N*, SVM нормализ.	63	58	52	69	62	57	82	64	62
1-1, SVM без норм.	67	62	58	67	65	61	80	68	65
1-*N*, SVM без норм.	64	58	53	71	62	57	83	66	65

Заключение

В работе описывается информационный подход к моделированию системы слухового восприятия. Предлагается система признаков на основе предложенного подхода. Рассматриваются вопросы использования системы признаков в оценке эмоционального состояния человека по голосу. Распознавание эмоционального состояния оказывается полезным в любой сфере человеческой деятельности, где требуется его оперативная оценка – в маркетинге, медицине, психологии, обеспечении безопасности и т. п. Полученные результаты вычислительного эксперимента подтверждают эффективность предложенных систем признаков.

Литература

1. *Марр Д.* Зрение : Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. М. : Радио и связь, 1987. 400 с.

2. *Позин Н.В.* Элементы теории биологических анализаторов. М. : Наука, 1978. С. 460.

3. *Люблинская В.В., Огородникова Е.А.* От классической психоакустики к психоакустике речи // Речевые технологии. 2010. № 2. С. 88–94.

4. *Утробин В.А.* Элементы теории активного восприятия изображений // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2010. Т. 81, № 2. С. 61–69.

5. *Burkhardt F., Paeschke A., Rolfes M., Sendlmeier W., Weiss B.* A database of german emotional speech // Proc. INTERSPEECH2005. 2005. P. 1517–1520.

6. *Nogueiras A. et al*. Speech emotion recognition using hidden Markov models // INTERSPEECH. 2001. P. 2679–2682.

7. *Wang K., An N., Li L.* Speech emotion recognition based on wavelet packet coefficient model // 9th International Symposium on Chinese Spoken Language Processing (ISCSLP). 2014. // IEEE, 2014. P. 478–482.

8. *He L. et al.* Recognition of stress in speech using wavelet analysis and teager energy operator // 9th Annual Conference, International Speech Communication Association and 12 Biennial Conference, Australasian Speech Science and Technology Association. ISCA, 2008. P. 605–608.

Модификация метода мотивационных индукторов Ж. Ньюттена

А.М. Голубев, Е.А. Дорошева

Новосибирский государственный университет
НИИ физиологии и фундаментальной медицины, Новосибирск
НИИ систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск

Актуальной задачей современной психологии выступает разработка измерительных инструментов для описания психологического времени личности (эмоциональное отношение и когнитивные представления о своем прошлом, настоящем, будущем, а также взаимосвязи данных временных интервалов) и жизненного пути человека. Психологическое время как психический феномен тесно связано с устойчивыми поведенческими характеристиками, изменяется при нарушении адаптации, в случае отклоняющегося развития или при адаптации к конкретным социальным условиям. Воздействие на установки, связанные с психологическим временем рассматривается как возможный способ повышения уровня благополучия человека [1]. Изучение различных аспектов психологического времени востребовано не только в рамках классической психологии, но и в междисциплинарных исследованиях, в частности, при изучении мозговых коррелятов автобиографической памяти, процессов планирования, характера мыслительных процессов в целом и т. д.

В настоящее время в России для измерения психологического времени применяется ряд психометрических инструментов разного рода (опросники, полупроективные и проективные методики, различные модификации «Списков событий» и т.д.). Одним из популярных инструментов является метод мотивационных индукторов Ньюттена (Ньюттен, 2004).

В настоящей работе предлагается модификация данного метода. Исходная версия представляет собой 40 незаконченных предложений (мотивационных индукторов), которые испытуемые заканчивают, указывая какие-либо события в будущем (мотивационные объекты), что позволяет выявлять различные характеристики перспективы будущего, а также мотивационные характеристики респондентов. Методика позволяет получить обширные материал, однако есть некоторые сложности в ее применении. Четко заданные исходные предложения предопределяют использование положительных и отрицательных мотивационных объектов, находящихся в области страхов, желаний, планов, и не позволяют выявить специфику собственного выбора испытуемым предпочитаемых им мотивационных индукторов. Из-за неприятия некоторых индукторов довольно часто наблюдаются прямые отказы испытуемых продолжать некоторые предложения либо использование формальных, протестных ответов (например, «я страстно желаю… ничего не желать», «я боюсь, что… я ничего не боюсь»). Способ кодировки ответов, предложенный автором методики, предполагает отнесение временной локализации событий будущего в соотношении с усредненным, стандартным жизненным путем и не позволяет выявить специфику субъективных представлений испытуемого о временной локализации своих событий будущего.

В связи с этим для расширения возможностей получения информации о субъективной составляющей перспективы будущего нами предложена модификация метода мотивационных индукторов (далее ММИ).

Методика поведения процедуры. Испытуемым предлагается список из десяти индукторов: «я мечтаю о», «я хочу, желаю», «я планирую, намереваюсь», «я работаю над», «я ожидаю», «я надеюсь», «я не хочу», «я боюсь, что», «я стремлюсь избежать», «я должен». Всего должно быть сформулировано 40 предложений, индукторы могут выбираться испытуемыми в произвольном порядке любое количество раз. Например, тестируемый пишет: «я хочу купить мороженое», «я хочу построить дом», «я работаю над проектом», «я ожидаю прихода лета». После того как испытуемый сформулировал 40 предложений (то есть описал свои мотивационные объекты, наполняющие перспективу будущего), ему предлагается оценить описанные события по степени важности и по временной локализации.

Важность (роль, которую событие играет или сыграет в жизни респондента) оценивается по пятибалльной шкале: 1 – незначительная роль, 2 – роль небольшой степени важности, 3 – роль умеренной степени важности, 4 – заметная роль, 5 – очень важная, ключевая роль. Для указания временной локализации необходимо отметить, когда исполнится (реализуется) каждое событие, выбрав подходящий из предложенных вариантов: *никогда не реализуется, в течение сегодняшнего дня, недели, месяца года, двух лет, пяти лет, десяти лет, более длительного времени (чем десять лет), в течение всей моей жизни*. Также предлагается вариант «затрудняюсь с ответом» (индикатор нечеткости представлений о своей перспективе будущего).

Проведен анализ взаимосвязей с показателями других методик, измеряющими временную перспективу. Выборку составили 80 человек, из них 63 женщины (от 24 до 59 лет, средний возраст – 35 лет) и 17 мужчин (от 29 до 42 лет, средний возраст – 34,7 года). Использовались методики, измеряющие психологическое время (семантический дифференциал времени): полупроективная методика, выявляющая особенности интуитивного восприятия испытуемым своего прошлого, будущего и настоящего [3], опросник временной перспективы Ф. Зимбардо [4]; а также методики, из-

меряющие другие показатели, теоретически связанные со шкалами ММИ: шкала психологического благополучия К. Рифф, самоактуализационный опросник САТ Э. Шострома, опросник мотивационных предпочтений Д. Джексона. Для оценки связей между показателями ММИ и шкалами других методик использовался ранговый коэффициент корреляции Спирмена.

В методике ММИ рассчитывалась шкала важности событий будущего как сумма оценок важности каждого отдельного события. Прямые связи данного показателя отмечены со следующими шкалами семантического дифференциала времени: с величиной настоящего (R = 0,21; p < 0,05), структурированностью настоящего (R = 0,32; p < 0,01), структурированностью будущего (R = 0,21; p < 0,05). Также выявлена прямая корреляция с интегральным показателем оценки настоящего (R = 0,24; p < 0,05). Показатель важности связан также со шкалой наличие целей в жизни методики К. Рифф (R = 0,26; p < 0,05). Рассматриваемый показатель имеет отрицательные взаимосвязи со шкалами методики мотивационных предпочтений: обратная связь в потребности в агрессии (R = –0,23; p < 0,05), потребности в развлечениях (R = –0,26; p < 0,05) и положительную связь с потребностью помогать другим людям (R = 0,26; p < 0,05).

Таким образом, по совокупности взаимосвязей показатель важности отражает ориентированность на цели будущего в противоположность предпочтению развлечений и непосредственного поведенческого реагирования; восприятие своего настоящего и будущего как имеющего более четкую структуру.

Рассчитывался показатель нереалистичности перспективы будущего – количество событий, обозначенных испытуемыми как те, которые не будут реализованы никогда. Также подсчитывалась перспектива будущего – как удаленность мотивационных объектов в будущем. Кроме того, подсчитывалось число событий в различных по удаленности периодах. Пример корреляционной связи, характеризующей показатели такого рода, – прямая связь числа объектов ближайшего будущего и шкалы компетентность во времени самоактуализационного опросника, которая отражает ориентацию на жизнь настоящим (R = 0,20; p < 0,05).

Определялся показатель неопределенности будущего – количество событий, неопределенных во времени. Неопределенность будущего демонстрирует прямую взаимосвязь с гедонистическим настоящим (R = 0,26; p < 0,05), обратные связи – с интегральной оценкой будущего (R = –0,20; p < 0,05), ощущаемостью будущего (R = –0,22; p < 0,05), величиной будущего по семантическому дифференциалу времени (R = –0,19; p < 0,05). Качественный анализ показал, что в большинстве случаев испытуемые приводили положительные и вполне реализуемые, достижимые мотивационные объекты, однако не оценивали их временную локализацию (реже как нереализуемые обозначались отрицательные объекты, которых человек не хочет, избегает, боится). Можно предполагать, что это отражало нарушение мотивации к заполнению методики и связано с ориентацией на «легкие» дела текущего момента в противоположность ориентации на будущее.

Интересные взаимосвязи наблюдаются с частотой выбора тех или иных индукторов. Здесь важно отметить также частоту выбора различных индукторов (см. таблицу). Наиболее часто выбирали индукторы «хочу», реже всего – отрицательные мотивационные индукторы и индуктор «ожидаю».

Частота выбора индуктора «хочу» отрицательно коррелирует как с общим показателем субъективного благополучия по методике К. Рифф, так и с отдельными шкалами этой методики. Наиболее выраженная отрицательная корреляция наблюдается с наличием целей в жизни (R = –0,44, p < 0,01). Также частота выбора данного индуктора имеет обратные корреляции с оценкой настоящего по семантическому дифференциалу времени (R = –0,22; p < 0,05), со следующими потребностями, по методике мотивационных предпочтений: в достижении (R = –0,36, p < 0,01), в выдержке (R = –0,23; p < 0,05), помощи другим (R = –0,23; p < 0,05) и положительную корреляцию с потребностью в спонтанности (R = 0,35; p < 0,01). Таким образом, увеличение данного показателя говорит о возрастании спонтанности, желания жить по ситуации, об уменьшении целей, ориентации на будущее.

Средняя, минимальная
и максимальная частоты выбора
различных мотивационных индукторов

Мотивационный индуктор	Средняя частота выбора	Минимальное число выборов	Максимальное число выборов
«хочу»	8,19	1	23
«мечтаю»	5,27	0	20
«планирую»	6,45	2	23
«боюсь»	2,55	0	6
«должен»	3,23	0	10
«не хочу»	2,92	0	6
«надеюсь»	3,79	0	8
«избегаю»	2,27	0	6
«работаю над»	3,56	0	13
«ожидаю»	2,51	0	9

Частота выбора индуктора «планирую» (второй по частоте выбор) прямо связана с ориентацией на будущее по опроснику временной перспективы Ф. Зимбардо (R = 0,25; p < 0,05). Данная шкала отражает как раз склонность к планированию, готовность отказываться от сиюминутного вознаграждения ради целей будущего.

Частота выбора индуктора «работаю над» имеет достаточно много связей: положительные с интегральной оценкой настоящего (R = 0,30; p < 0,01) и будущего (R = 0,21; p < 0,05) по семантическому дифференциалу времени; с потребностями в достижениях (R = 0,37; p < 0,01), в вы-

держке (R = 0,32; p < 0,01), в помощи другим (R = 0,26; p < 0,05), в размышлениях, анализе (R = 0,21; p < 0,05) по опроснику мотивационных предпочтений. Обратные связи – по опроснику мотивационных предпочтений с потребностью в развлечениях (R = –0,28; p < 0,01), по опроснику субъективного благополучия К. Рифф с автономией Рифф (R = –0,31; p < 0,01), с наличием целей в жизни (R = –0,26; p < 0,05) Таким образом, данный показатель связан с целеустремленностью, нацеленностью на результат, активностью, потребностью в достижениях, а также с готовностью сотрудничать.

Частота выбора отрицательного мотивационного индуктора «боюсь» прямо связана с негативным прошлым по опроснику временной перспективы (R = –0,29; p < 0,01), обратно связана с потребностью привлекать внимание по опроснику мотивационных предпочтений (R = –0,22; p < 0,01), автономией (R = –0,33; p < 0,01) по опроснику субъективного благополучия, самопринятием по самоактуализационному тесту (R = –0,24; p < 0,05). Таким образом, увеличение числа страхов связано с возрастанием желания быть менее заметным, количеством травматических событий в прошлом, снижением независимости и меньшим принятием себя.

Частота выбора индуктора «надеюсь» прямо коррелирует с потребностью в порядке (R = –0,23; p < 0,05) и обратно – с потребностями в аффиллиации (R = –0,26; p < 0,05), доминантности (R = –0,28; p < 0,01), социальной репутации (R = –0,34; p < 0,01), в покровителе (R = –0,27; p < 0,01), спонтанность (R = –0,21; p < 0,05). Резюмируя, можно заключить, что надежды на будущие события связаны с потребностью в контроле, порядке, при этом с нежеланием разного рода коммуникаций.

Частоты выбора остальных индукторов имели мало корреляций, которые относительно сложно интерпретировать, т. е. данные показатели менее информативны.

Следует отметить, что при выполнении предлагаемого модифицированного варианта методики почти не наблюдалось отказов, что мы связываем с возможностью выбора тех индукторов, которые подходят для индивидуальных мотивационных объектов, возникающих у испытуемых при представлении ими своего будущего.

Литература

1. *Зимбардо Ф., Бойд Дж.* Парадокс времени. Новая психология времени, которая улучшит вашу жизнь. СПб. : Речь, 2010.
2. *Нюттен Ж.* Мотивация, действие и перспектива будущего. М. : Смысл, 2004.
3. *Вассерман Л.И., Кузнецов О.Н., Ташлыков В.А., Тейверлаур М., Червинская К.Р., Щелкова О.Ю.* Семантический дифференциал времени как метод психологической диагностики личности при депрессивных расстройствах : Пособие для психологов и врачей. С.-Петербург, 2005. 27 с.
4. *Сырцова А., Соколова Е.Т., Митина О.В.* Методика Ф. Зимбардо по временной перспективе // Психологическая диагностика, 2007. № 1. С. 85–93.

ЭЭГ корреляты ступени переориентации тональной схемы в контролируемых музыкальных стимулах и фрагментах классических произведений

К.Н. Громов[1], Г.С. Радченко[1], А.И. Федотчев[2], М.Н. Корсакова-Крейн[3]

[1] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2] Институт биофизики клетки РАН, Пущино-на-Оке
[3]Touru College, New York, USA

Введение

Музыка все больше используется как средство терапии и коррекции состояний человека и реабилитации в различных областях психофизиологии, медицины и психологии [1]. В связи с этим актуально исследование влияния базовых элементов музыки на функциональное состояние человека. Знание того, как компоненты музыки воздействуют на человека, позволило бы точнее подбирать необходимые элементы музыки и более эффективно использовать ее как средство коррекции.

Исследования эмоциональных реакций на прослушивание музыки показывают изменения общих физиологических показателей, таких как ритмы сердца и дыхания [2], уровень электропроводимости кожи [3], и гормональные изменения [4], что указывает на отклик автономной нервной системы.

Восприятие музыки опирается на тональную систему отсчета, которую обычно называют гаммой [5]. В пространстве музыкального мира доминирует диатоническая гамма, тона в которой отличаются по звуковысотности и по уровню притяжения к тональному центру – тонике (первой ноте гаммы). Переориентация диатонической гаммы с одной тоники на другую, т. е. переход из одной тональности в другую в пределах той же самой композиции – называется тональной модуляцией. Тональная модуляция является одним из главных структурных компонентов музыки и одним из ключевых средств выразительности в европейской музыкальной культуре [5].

Как правило, расстояния между тональностями показываются с помощью квинтового круга (рис. 1). Переориентация тонального пространства приводит к замене определенного числа тонов. На рис. 2 показано, как переориентация с «до» мажор на соседний (отличающийся на 1 шаг по квинтовому кругу) «соль» мажор приводит к замене лишь 1 тона. Тогда как переориентация на «си» мажор (отличающийся на 5 ступеней по квинтовому кругу) ведет к замещению пяти тонов в начальной гамме. Чем дальше расстояние от начального тонального центра до конечного, тем больше замен среди тонов начальной гаммы (см. рис. 2).

Предыдущие исследования показали, что ладовое условие и расстояние модуляции музыкальных фрагментов влияют на характеристики ЭЭГ [6]. Эти изменения проявляются даже у детей в возрасте 30 месяцев [7]. На основании этих данных нами были выбраны 3 ступени переориентации тонального пространства (субдоминанта, доминанта, секста) для сравнения воздействия гармонических последовательностей и отрывков музыкальных произведений.

Рис. 1. Квинтовый круг. Показаны начальная тональность («до» мажор), близкая к ней модуляция («соль» мажор) и дальняя модуляции («си» мажор). Рисунок заимствован из книги [8]

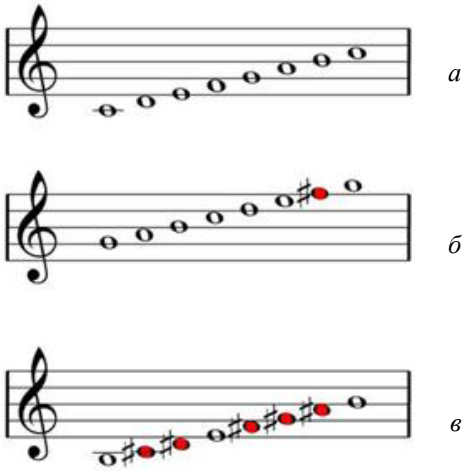


Рис. 2. Расстояние в тональном пространстве. Выделены ноты, заменяемые при переориентации тонального пространства по сравнению с начальной гаммой; *а* – начальная тональность «до» мажор (C), *б* – близкая к «до» мажор тональность «соль» мажор (G), *в* – дальняя к «до» мажор тональность «си» мажор (B). Рисунок заимствован из книги [8]

Процедура эксперимента

В исследовании приняло участие 15 человек (5 мужчин и 10 женщин) в возрасте от 17 до 28 лет. Опыт игры на музыкальных инструментах и занятий вокалом имели 12 добровольцев (средняя продолжительность 4 года), ни один не являлся профессиональным музыкантом. Перед участием в эксперименте каждый испытуемый ознакомился и подписал форму добровольного информирован-

ного согласия на участие. Эксперимент был организован и проводился в соответствии с этическими нормами, установленными Хельсинской декларацией 1964 года.

Испытуемым предлагалось прослушать 2 серии стимулов: 24 гармонических последовательности и 24 отрывка из музыкальных произведений. Каждая серия включала в себя 3 тональные дистанции: ступень 5 (субдоминанта), ступень 7 (доминанта) и ступень 8 (малая секста), по 8 стимулов каждая. Все произведения были в мажорном ладу. Стимулы предъявлялись в случайном порядке.

Гармонические последовательности были специально написаны для этого эксперимента. Каждая музыкальная фраза состояла из 8 аккордов. Первые три – пять аккордов устанавливали начальную тональность, а следующие за ними переходные аккорды совершали модуляцию в заключительную тональность посредством обычной каденции доминанта – тоника. Музыкальные фразы были одинаковы по темпу, стилю, громкости, тембру и фактуре. Стилистическое единообразие предотвращало интеракцию между ладом и фактурой [9]. Фразы отличались по степени модуляции, по ритму и проходящим нотам (для плавности модуляции). Выбор начальной тональности в каждом музыкальном стимуле был произвольным. В зависимости от степени модуляции некоторые из фраз потребовали меньшее количество переходных аккордов, чем другие. Все модуляции были плавными и не содержали каких-либо неожиданных сопоставлений между аккордами. Каждая музыкальная фраза была по продолжительности 11 секунд и включала небольшое замедление в конце для более естественного звучания. Последний аккорд продолжался 3 секунды, чтобы подчеркнуть заключительную тональность.

Музыкальные отрывки были взяты из классических произведений Моцарта, Хайдена, Шуберта и Бетховена продолжительностью 10–15 секунд. Тональное расстояние определялось по количеству тонов, заменяемых в гамме начальной тональности во время перехода в заключительную тональность, и по взаимоотношениям начального и заключительного тонических трезвучий.

Запись электроэнцефалограммы осуществлялась при помощи электроэнцефалографа-анализатора ЭЭГА-21\26 «Энцефалан-131-03» компании Медиком-МТД (Таганрог, Россия). Схема монтажа отведений – «BaseMonopolar», частота дискретизации – 250 Гц, использовались следующие параметры фильтрации исходного сигнала: частота среза фильтра верхних частот – 0,5 Гц, частота среза фильтра нижних частот 70 Гц, режекторный фильтр на частоте сети – 50 Гц. Для спектрального анализа использовались данные ЭЭГ за 10 с до предъявления аудиофрагмента, 10 с во время предъявления аудио фрагмента и 10 с после предъявления аудио фрагмента. Анализ проводился в следующих частотных диапазонах: тета (4–8 Гц), альфа (8–13 Гц), бета-1 (13–21 Гц) и бета-2 (21–35 Гц). Дельта-диапазон (0,5–4 Гц) не анализировался из-за сильной зашумленности. Для статистической обработки использовались средние по всем отведениям относительные значения мощностей, вычисляемые по формуле:

$$P_{отн}(\Delta f) = \frac{P_{абс}(\Delta f)}{P_{абс}} \cdot 100\%.$$

Здесь $P_{абс}(\Delta f)$ – абсолютное значение мощности в частотном диапазонеΔ f; $P_{абс}$ – суммарное абсолютное значение мощности во всех частотных диапазонах.

Регистрация ЭЭГ осуществлялась в положении сидя, на кресле с возможностью регулировки высоты спинки, подлокотников и высоты кресла относительно пола. Во время записи 10-секундного фона до стимула испытуемые находились в полной тишине и получали команду закрыть глаза, расслабиться. Прослушивание музыкальных фраз осуществлялось с помощью динамиков, испытуемому давалась инструкция осуществлять прослушивание с закрытыми глазами и не открывать их до команды экспериментатора. Во время 10-секундного фона после прослушивания испытуемые заполняли бланк анкеты семантического дифференциала (в данном исследовании он не рассматривается).

Статистическая обработка велась при помощи программ Microsoft Excel 2010 и Statistica 10. Вычислялся *W*-критерий Уилкоксона для зависимых выборок. После этого проводилась поправка на множественные сравнения с помощью метода Беньямини – Йекутили [10].

Результаты и обсуждение

Прослушивание и гармонических последовательностей, и отрывков музыкальных произведений увеличивало мощность в альфа ($p \leq 0{,}05$) и уменьшало в бета-2 ($p \leq 0{,}01$) диапазонах по сравнению с 10-секундным фоном до прослушивания, что согласуется с предыдущими исследованиями о влиянии музыки на характеристики ЭЭГ [1–3]. Мы связываем это с синхронизацией корковых структур, что свидетельствует о снижение уровня напряжения и об общем расслаблении, что подтверждает благоприятный эффект при прослушивании музыки [3, 11].

При сравнении между собой гармонических последовательностей с переориентацией в субдоминанту, доминанту и сексту не было выявлено значимых различий.

Прослушивание отрывков музыкальных произведений с переориентацией на доминанту приводило к меньшему увеличению мощности в альфа-диапазоне ($p \leq 0{,}01$) по сравнению с субдоминантой и секстой, а также большее увеличение мощности в бета-2 диапазоне ($p \leq 0{,}01$) по сравнению субдоминантой (рис. 3).

В обоих полушариях мозга переориентация тонального пространства на доминанту при прослушивании отрывков музыкальных произведений достоверно различалась в тета ($p \leq 0{,}01$), альфа ($p \leq 0{,}01$) и бета-2-диапазонах ($p \leq 0{,}01$) по срав-

нению с субдоминантой, а так же в альфа и бета-1 ($p \leq 0{,}01$) диапазонах по сравнению с секстой. И в правом и в левом полушариях прослушивание с переориентацией на доминанту имело меньший прирост мощности в альфа и больший в бета-1 диапазоне по сравнению с субдоминантой и секстой (рис. 4, 5). То, что доминанта оказывает достоверно отличимое влияние на характеристики ЭЭГ, требует дополнительного исследования.

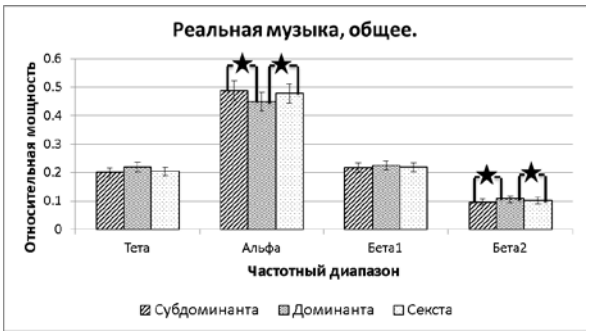


Рис. 3. Сравнение субдоминанты, доминанты и сексты в контексте прослушивания отрывков музыкальных произведений. Звездочкой отмечены достоверные различия ($p \leq 0{,}05$)

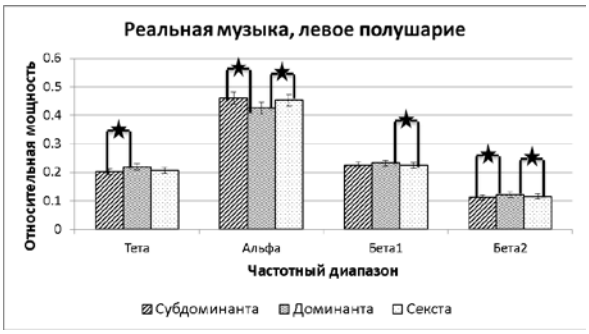


Рис. 4. Сравнение субдоминанты, доминанты и сексты в контексте прослушивания отрывков музыкальных произведений в левом полушарии. Звездочкой отмечены достоверные различия ($p \leq 0{,}05$)

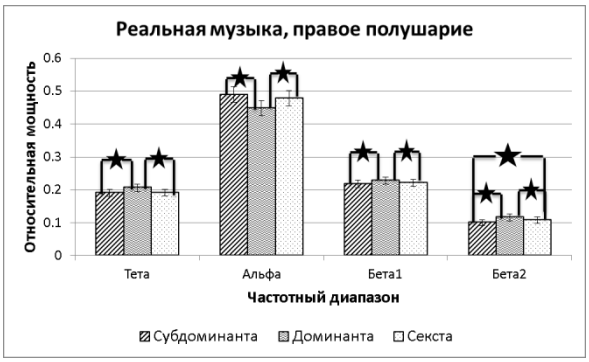


Рис. 5. Сравнение субдоминанты, доминанты и сексты в контексте прослушивания отрывков музыкальных произведений в правом полушарии. Звездочкой отмечены достоверные различия ($p \leq 0{,}05$)

Различий в характеристиках ЭЭГ между прослушиванием отрывков музыкальных произведений и гармонических последовательностей (сравнивались попарно по ступеням переориентации) выявлено не было. Это может говорить о том, что тональная модуляция в гармонических последовательностях (где остальные параметры музыкального произведения сведены к минимуму) и в отрывках музыкальных произведений имеет одинаковое воздействие на характеристики ЭЭГ. Это дает возможность предполагать, что модуляция тонального пространства является одним из существенных факторов влияния музыкальных произведений на человека.

В фоне после прослушивания стимулов отмечалось снижение мощности в альфа- и увеличение в тета-диапазонах по сравнению с прослушиванием стимула. Для отрывков музыкальных произведений отмечался достоверно больший уровень мощности в альфа-диапазоне и достоверно меньший уровень в тета-диапазоне по сравнению с гармоническими последовательностями. Таким образом, несмотря на то что различий между гармоническими последовательностями и отрывками музыкальных произведений при прослушивании не было, тем не менее эффект, который оказали фрагменты музыкальных произведения, приводил к меньшему снижению в альфа-ритме после прослушивания стимулов.

В 10-секундном периоде после предъявления стимула между отрывками музыкальных произведений и гармоническими последовательностями (сравнивались попарно по ступеням переориентации) достоверные различия были получены в тета ($p \leq 0{,}01$) и альфа ($p \leq 0{,}01$) диапазонах во всех 3 ступенях тональной модуляции. После прослушивания отрывков музыкальных произведений мощность в альфа-диапазоне была выше, а в тета-диапазоне ниже по сравнению с гармоническими последовательностями. Таким образом, несмотря на то что различий между гармоническими последовательностями и отрывками музыкальных произведений при прослушивании не было, эффект, который оказывали произведения (увеличение мощности альфа диапазона и уменьшения мощности бета-2 диапазона), приводил к меньшему снижению мощности альфа-диапазона после прослушивания. Это может говорить о том, что на результат прослушивания фрагментов музыкальных произведений оказывали эффект другие компоненты музыки.

Выводы

Было показано, что тональная модуляция в гармонических последовательностях и в отрывках музыкальных произведений оказывает одинаковый эффект на характеристики ЭЭГ. Это дает возможность предполагать, что тональная модуляция является одним из факторов воздействия музыки на функциональное состояние человека.

Сравнение 10-секундного периода после прослушивания показало, что эффект от прослушивания музыкальных произведений приводил к меньшему снижению мощности в альфа-диапазоне после прослушивания и меньшему повышению мощности в тета-диапазоне. Исходя из этих соображений, можно сделать вывод, что в музыкальных произведениях по сравнению с гармоническими последовательностями (где остальные па-

раметры музыкального произведения сведены к минимуму) существуют дополнительные факторы воздействия музыки на функциональное состояние человека.

Работа выполнена при поддержке гранта РГНФ № 14-36-01024.

Литература

1. *Федотчев А.И., Радченко Г.С.* Музыкальная терапия и «музыка мозга»: состояние, проблемы и перспективы исследований // Успехи физиологических наук. 2013. Т. 44, вып. 4. С. 35–50.

2. *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 (4). P. 445–452.

3. *Guhn M., Hamm A., Zentner M.* Physiological and musicoacoustic correlates of the chill response // Music Perception. 2007. V. 24(5). P. 473–484.

4. *Vanderark S.D., Ely D.* Cortisol, Biochemical, and Galvanic Skin Responses to Musical Stimuli of Different Preference Values by College Students in Biology and Music // Perceptual and Motor Skills. 1993. V. 77(1). P. 227–234.

5. *Deutsch D.* The Psychology of Music. Third Edition. Academic Press, 2013. P. 786.

6. *Радченко Г.С. и др.* Влияние характеристик тональной модуляции музыкальных фрагментов на показатели ЭЭГ // XVII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2015»: Сборник научных трудов. В 3 ч. Ч. 1. М. : НИЯУ МИФИ, 2015. 244 с.

7. *Jentschke S., Friederici A.D., Koelsch S.* Neural correlates of music-syntactic processing in two-year old children // Developmental Cognitive Neuroscience. 2014. V. 9. P. 200–208.

8. *Korsakova-Kreyn M.N.* The universe of music. Charleston, SC : CreateSpace Independent Publishing Platform. 2010. P. 76.

9. *Korsakova-Kreyn M.N., Dowling W.J.* 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.

10. *Benjamini Y., Yekutieli D.* The control of the false discovery rate in multiple testing under dependency // The Annals of Statistics. 2001. V. 29(4). P. 1165–1188.

11. *Lin V.P. et al.* Revealing spatio-spectral electroencephalographic dynamics of musical mode and tempo perception by independent component analysis // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2014. V. 11(18).

Перемежаемость в поведении таламо-кортикальных осцилляторных паттернов на ЭЭГ крыс с предрасположенностью к абсанс-эпилепсии

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

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

Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) является одним из наиболее распространенных и эффективных методов получения информации о работе головного мозга в различных нейрофизиологических исследованиях [1]. ЭЭГ представляет собой усредненную сумму электрических токов, генерируемых группой нейронов в области регистрирующего электрода. Традиционно на ЭЭГ выделяют набор частотных диапазонов (альфа, бета, гамма и т.д.). Хорошо известно, что существует четкая корреляция между характером ритмической активности на ЭЭГ в определенном частотном диапазоне (формированием так называемого осцилляторного паттерна) и функциональным состоянием организма [2].

Таким образом, важной задачей при исследовании сигналов ЭЭГ и нервной системы в целом является анализ различных характерных осцилляторных паттернов. Особенно это актуально в случае изучения различных патологий центральной нервной системы, поскольку некоторые характерные осцилляторные паттерны могут выступать в роли биомаркеров того или иного заболевания.

Одной из важных патологий для исследования является абсанс-эпилепсия [3]. Абсанс-эпилепсия представляет собой неконвульсивную форму заболевания и характеризуется спонтанными кратковременными выключениями сознания. С одной стороны, больной абсанс-эпилепсией не сохраняет воспоминаний о приступе, что значительно осложняет диагностику данной патологии традиционными методами, с другой стороны, приступы абсанс-эпилепсии сопровождаются появлениями на сигнале ЭЭГ характерных биомаркеров – пик-волновых разрядов, что открывает возможности для диагностики через изучение сигналов ЭЭГ.

Пик-волновые разряды – характерные осцилляторные паттерны на ЭЭГ с высокой амплитудой и характерной частотой 8–10 Гц. Данные колебания носят генерализованный характер, т. е. во время формирования пик-волнового разряда происходит вовлечение в синхронную активность практически всей таламо-кортикальной нейронной сети головного мозга [4]. Представляет значительный интерес выявление связи между патологической активностью нейронного ансамбля (пик-волновыми разрядами) и нормальными осцилляторными паттернами, также генерируемыми в таламо-кортикальной подсети головного мозга, – сонными веретенами. Ранее были сделаны предположения об их связи, и даже о трансформации сонных веретен в пик-волновые разряды [3]. Все это делает перспективным изучение сонных веретен на предмет возможности использования их как эффективные биомаркеры эпилепсии, когда изменения в нормальной структуре сонных веретен могут служить прогностическим признаком для ранней диагностики абсанс-эпилепсии. В данных исследованиях интерес представляет не только изучение частотно-временной структуры характерных осцилляторных паттернов (сонных веретен и пик-волновых разрядов), но также выявление закономерностей их появления на сигнале ЭЭГ.

В настоящей работе была изучена частотно-временная динамика для сонных веретен и пик-волновых разрядов. Исследования проводились для записей ЭЭГ шести крыс линии WAG/Rij. Данная линия животных имеет врожденную предрасположенность к абсанс-эпилепсии и является одной из наиболее распространенных моделей этого заболевания.

Для исследования закономерностей появления сонных веретен и пик-волновых разрядов данные осцилляторные паттерны были предварительно выделены на сигналах ЭЭГ. Автоматическое выделение осцилляторных паттернов на ЭЭГ было проведено при помощи специально разработанных методов автоматической разметки ЭЭГ, предложенных в работе [5] и основанных на комбинированном использовании аппарата непрерывного вейвлетного анализа [6] и разложения сигнала по эмпирическим модам [7]. В результате была получена автоматическая разметка исследуемых сигналов ЭЭГ, содержащая сонные веретена и пик-волновые разряды, как показано на рис. 1.

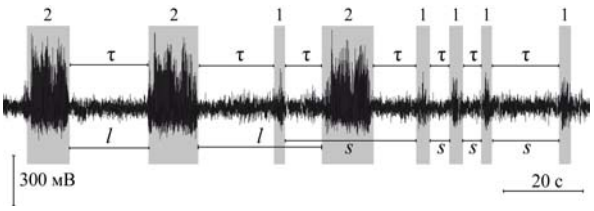


Рис. 1. Пример разметки ЭЭГ и выделения временных интервалов между последовательными событиями на сигнале ЭЭГ для сонных веретен (1) и пик-волновых разрядов (2)

Предполагается, что эпилептические пик-волновые разряды являются результатом гиперсинхронизации нейронов в таламо-кортикальной сети, образование сонных веретен также, судя по всему, связано с установлением синхронных режимов. Таким образом, данные паттерны на сигнале ЭЭГ могут быть рассмотрены как короткие

периоды синхронизации, разделенные длительными периодами несинхронной активности – фоновая ЭЭГ, различные артефакты, т. е. наблюдается так называемая перемежаемость [8]. Перемежаемость встречается в самых различных нелинейных колебательных системах, в том числе биологических, и заключается в непериодическом переключении системы между так называемыми ламинарными и турбулентными фазами. В случае с сигналом ЭЭГ ламинарная фаза представлена в виде длительных периодов несинхронной фоновой активности, в то время как характерные осцилляторные паттерны представляют собой фазу гиперсинхронизации таламо-кортикальной сети головного мозга.

Полученные данные автоматической разметки послужили исходным материалом для изучения временной динамики осцилляторных паттернов на ЭЭГ. Для этого был проведен статистический анализ интервалов времени между последовательными сонными веретенами и пик-волновыми разрядами (s и l соответственно), и получены статистические распределения $N(s)$ и $N(l)$.

Полученные распределения тестировались на соответствие степенному закону $N(l) = \beta l^{\alpha}$. В данном случае важную роль играет значение показателя α, поскольку различные значения α соответствуют различным динамическим режимам в исследуемой системе, в том числе различным видам перемежаемости. В частности, одним из таких режимов является on-off-перемежаемость [9], для которого $\alpha = -3/2$. Ряд исследователей сообщают о наличии on-off-перемежаемости в поведении спонтанно возникающих осцилляторных паттернов на ЭЭГ крыс и человека [10], поэтому было выдвинуто предположение о том, что динамика поведения некоторых таламо-кортикальных паттернов (сонных веретен и пик-волновых разрядов) также может быть описана в рамках теории on-off-перемежаемости.

В ходе исследования экспериментально полученные распределения $N(s)$ и $N(l)$ строились для разных значений шага по времени Δs и Δl и сравнивались с теоретическим степенным законом $N(l) = \beta l^{\alpha}$, а также рассчитывалось значение среднеквадратической ошибки ε между ними. Значение показателя α в степенном законе искалось отдельно для каждого из исследуемых типов характерных осцилляторных паттернов у каждого из экспериментальных животных путем подбора такого значения шага по времени Δs и Δl, при котором значение среднеквадратической ошибки ε между экспериментальным распределением и теоретическим законом будет минимальным. Пример такой процедуры представлен на рис. 2.

В ходе проведения исследований было обнаружено, что $\alpha = -3/2$ является оптимальным значением показателя степени в степенном законе и для сонных веретен и для пик-волновых разрядов у всех шести исследуемых экспериментальных животных, что соответствует режиму on-off-перемежаемости. Пример экспериментально полученного распределения $N(l)$ и соответствующего ему степенного закона для одного из экспериментальных животных представлен на рис. 3, *А*.

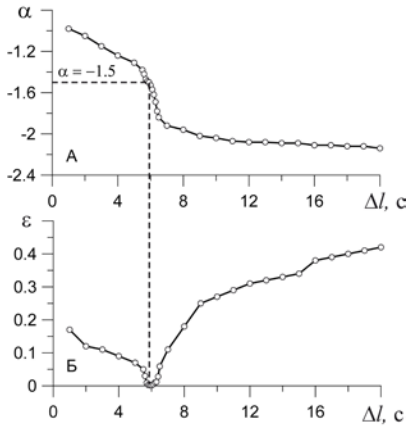


Рис. 2. Зависимость показателя степени α (А) и среднеквадратической ошибки ε (Б) от значения выбранного шага по времени Δl для сонных веретен одного из экспериментальных животных

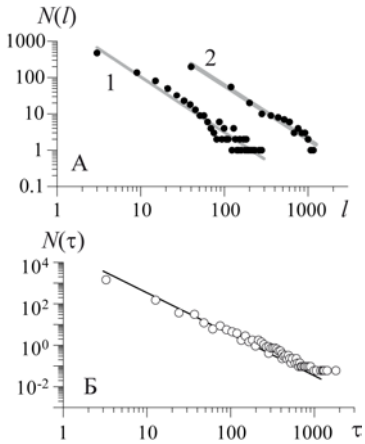


Рис. 3. Пример экспериментального и теоретического распределения $N(l)$: *А* – для раздельного рассмотрения сонных веретен (1) и пик-волновых разрядов (2) и *Б* – для совместного рассмотрения данных паттернов

Полученные результаты свидетельствуют о наличии on-off-перемежаемости в поведении сонных веретен и пик-волновых разрядом, что говорит о схожести их временной динамики и о существовании определенной связи между ними. Кроме того, данные паттерны являются результатом синхронизации одной и той же таламо-кортикальной нейронной сети, поэтому можно ожидать также сходства в механизмах их возникновения. Данные факты позволили выдвинуть предположение, что совместная временная динамика сонных веретен и пик-волновых разрядов может соответствовать еще более сложным динамическим режимам в нейронной сети, например перемежаемости перемежаемостей [11].

Перемежаемость перемежаемостей встречается в системах, где сосуществуют и сменяют друг друга два различных типа перемежаемости. Исследования показывают, что в системах с двумя сосуществующими перемежаемостями типа on-off значение показателя α в степенном законе соста вляет –2 и существует так называемая on-off – on-off-перемежаемость перемежаемостей.

В настоящей работе для исследования совместной временной динамики сонных веретен и пик-волновых разрядов была использована та же разметка сигналов ЭЭГ, что и раньше, только в данном случае автоматическая разметка этих двух типов паттернов анализировалась совместно (см. рис. 1, интервалы τ).

Как и в предыдущем случае, экспериментально полученные распределения $N(\tau)$ строились для разных значений шага по времени $\Delta\tau$ и сравнивались с теоретическим степенным законом $N(\tau) = \beta\tau^{\alpha}$, а также рассчитывалось значение среднеквадратической ошибки ε между ними. Как видно из рис. 3, *Б*, $\alpha = -2$ является оптимальным значением показателя степени в степенном законе. Это с достаточной точностью выполняется и для остальных исследованных крыс WAG/Rij, что подтверждает наличие режима on-off – on-off перемежаемости перемежаемостей во временной динамике сонных веретен и пик-волновых разрядов на эпилептической ЭЭГ крыс WAG/Rij.

Результаты, полученные в настоящей работе, позволяют предположить глубокую связь в механизмах возникновения сонных веретен и пик-волновых разрядов благодаря общности их временной динамики. Дальнейшие исследования в данной области не только интересны с точки зрения понимания процессов формирования и развития абсанс-эпилепсии, но также открывается возможность для использования сонных веретен в диагностике абсанс-эпилепсии.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 15-02-00624 и 14-02-31235) и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (конкурс «У.М.Н.И.К.», № 0002038).

Литература

1. *Lopes da Silva F.H., Nunez P.L., Srinivasan K.* Electric fields of the brain: the neurophysics of EEG. Oxford University Press, 2006.

2. *Niedermeyer E., Fernando L.S.* Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. Lippincott Williams and Wilkins, 2004.

3. *Kostopoulos G.* Spike-and-wave discharges of absence seizures as a transformation of sleep spindles: the continuing development of a hypothesis // Clin. Neurophysiol. 2000. V. 111. P. 27–38.

4. *Steriade M., Deschenes M.* The thalamus as a neuronal oscillator // Brain Res. Rev. 1984. V. 8. P. 1.

5. *Грубов В.В., Ситникова Е.Ю., Короновский А.А., Павлов А.Н., Храмов А.Е.* Автоматическое выделение и анализ осцилляторных паттернов на нестационарных сигналах ЭЭГ с использованием вейвлетного преобразования и метода эмпирических мод // Изв. РАН. Сер. физическая. 2012. Т. 12, вып. 76. С. 1520–1523.

6. *Daubechies I.* Ten lectures on wavelets. Philadelphija : SIAM, 1992.

7. *Huang E.N., Shen Z., Long S.R. et al.* The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. Soc. Lond. A. N. 1998. V. 1978, № 454. P. 903–995.

8. *Berge P., Pomeau Y., Vidal C.* L'Ordre Dans Le Chaos. Paris : Hermann, 1988.

9. *Platt N., Spiegel E.A., Tresser C.* On-off intermittency: a mechanism for bursting // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70, № 3. P. 279–282.

10. *Perez J.L.* Type III inermittency in human partial epilepcy // European Journal of Neuroscience. 1999. V. 11. P. 2571–2576.

11. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Zhuravlev M.O., Ponomarenko V.I.* Intermittency of intermittencies // Chaos. 2013. V. 23. P. 033129.

Исследование динамики развития спонтанной пачечной активности модели сети нейронов с долговременной синаптической пластичностью

А.А. Дегтерев, М.С. Бурцев

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Введение

Одним из объектов исследований современных нейронаук являются культуры нейронов *in vitro*. Культура нейронов представляет собой высаженные в питательную среду нейроны мозга новорожденных животных (как правило, мышей или крыс), которые прикрепляются к подложке, содержащей упорядоченный массив электродов, делятся, устанавливают связи друг с другом и со временем образуют плотную связанную сеть. Каждый электрод может регистрировать электрическую активность ближайших нейронов, и, с другой стороны, подаваемый на электрод электрический импульс может вызвать генерацию потенциала действия ближайшими нейронами.

При регистрации электрической активности культуры нейронов большую часть времени на электродах фиксируется активность в виде случайных, не синхронизированных друг с другом спайков (потенциалов действия). Однако иногда одновременно на многих электродах можно наблюдать резкое повышение уровня активности в течение короткого промежутка времени – такое явление называют спонтанной популяционной пачкой активности культуры или просто пачкой активности.

В современных работах по изучению электрофизиологической активности культур нейронов *in vitro* феномену пачечной активности уделяется особое внимание [1–7, 12]. В частности, изучаются вопросы развития пачечной активности в течение жизни культур [1, 2], ответа культур на электрическую стимуляцию [3, 4]. Также на пачечной активности построены эксперименты по обучению культур [5], навигации робота [6] и многие другие работы.

При моделировании активности культуры нейронов феномен пачечной активности является одним из критериев верификации модели. Однако, несмотря на большое количество работ по моделированию активности биологических нейронных сетей, приемлемой модели, позволяющей получить полное согласование с активностью культуры *in vitro*, пока не существует.

В данной работе в качестве базовой модели культуры нейронов была взята модель сети с входным пуассоновским шумом на нейроны из работы [7]. Данная модель позволяет воспроизвести спонтанную пачечную активность культуры нейронов *in vtiro*, однако она содержит неизменяемые веса синапсов, поэтому не может быть использована для изучения вопроса изменений активности с течением времени. Модель статичного синапса была заменена моделью синапса с долговременной пластичнотью STDP (spike-timing dependent plasticity – пластичность, зависящая от временного хода спайков) [8, 9], и был исследован вопрос изменения спонтанной пачечной активности в модели сети нейронов с синаптической пластичностью в течение длительного времени симуляции.

Моделирование осуществлялось с помощью нейросимулятора NEST [10], вычисления проводились на МВК НИЦ «Курчатовский институт» (http://computing.kiae.ru/).

Модель культуры нейронов

Нейронная сеть состоит из 5000 нейронов Ижикевича [11], связанных друг с другом случайным образом. Количество исходящих связей каждого из нейронов с другими нейронами сети нормально распределено в интервале $(0, K_{max})$, со средним $\mu = K_{max} / 2$ и стандартным отклонением $\sigma = K_{max} / 6$. Доля возбуждающих нейронов равняется $R = 70$ % от общего количества нейронов, доля тормозных нейронов – $(1 - R)$ %. Временные задержки распространения спайков между нейронами задаются нормально распределенными в интервале $(0, D_{max})$ мс. Веса связей между нейронами распределены нормально в диапазоне $(0, x)$ мВ в соответствии с изменением мембранного потенциала постсинаптического нейрона на $(0, x)$ мВ для возбуждающих связей и $(–x, 0)$ мВ для тормозных связей.

Реализация входного шума осуществлена в виде входящей пуассоновской последовательности спайков на каждый из нейронов. Средняя частота этих спайков достаточно большая, 400 спайков/с [7]. Экспериментально известно [12], что фоновая частота активности нейронов, т. е. частота генерации спайков вне популяционных пачек, находится в диапазоне 0,3–0,5 Гц. Поэтому вес входящих шумовых спайков был выбран 2,8 мВ для возбуждающих нейронов и 0,8 мВ для тормозных нейронов, что приводило к спонтанной активности нейронов с частотами до 0,5 Гц.

Фундаментальным свойством синапсов является способность изменять силу связи пост- и пресинаптического нейронов, называемая синаптической пластичностью. Модель долговременной пластичности STDP является моделью долговременной потенциации (увеличения силы синаптической связи) и долговременной депрессии (ослабления силы синаптической связи).

Модель STDP, реализованная в NEST, описана в [8].

Вкратце, суть модели STDP состоит в следующем. Пусть имеются пре- и постсинаптический нейроны (нейроны 1 и 2 соответственно). Если в некоторый момент времени t_0 на нейроне 1 возник спайк, и затем этот спайк достиг нейрона 2 в момент времени t_1, а далее, в момент времени t_2, нейрон 2 сгенерировал спайк, тогда разница времени $\Delta t = t_2 - t_1$ выражает хронологию следования спайков пост- и пресинаптического нейронов. Случай $\Delta t > 0$ описывает ситуацию, когда спайк нейрона 1 мог быть причиной возникновения спайка нейрона 2, в таком случае вес синаптической связи увеличивается. При $\Delta t \le 0$ спайк нейрона 1 достиг нейрона 2 уже после того, как нейрон 2 сгенерировал спайк, поэтому спайк нейрона 1 не мог быть причиной возникновения спайка на нейроне 2, и в таком случае вес синаптической связи ослабляется.

В случае аддитивной модели STDP, когда изменение синаптического веса не зависит от текущего значения веса и для фиксированного Δt изменяется на одинаковую величину, закон изменения синаптического веса может быть описан формулой

$$\Delta W = -\lambda\alpha \exp(-|\Delta t| / \tau_-) \quad \text{при } \Delta t \le 0 \qquad (1)$$

$$\Delta W = \lambda \exp(-|\Delta t| / \tau_+) \quad \text{при } \Delta t > 0,$$

где ΔW – изменение синаптического веса; $\Delta t = t_2 - t_1$; τ_+, τ_- – константы, определяющие временной интервал возникновения корреляционных эффектов между спайками пре- и постсинаптического нейронов; λ – константа, определяющая величину изменения веса; α – константа асимметричности, при $\alpha > 1$ ослабление весов (депрессия) имеет более сильный эффект, чем усиление весов (потенциация) при равных по модулю Δt. Параметр λ имеет следующий смысл: при Δt, близком к 0, значение λ равно изменению синаптического веса на величину λW_{max}, где W_{max} – максимально допустимое значение веса.

Результаты

Параметры модели культуры нейронов были выбраны следующими [7]: количество нейронов 5000, $K_{max} = 1000$, $R = 70$ %, $D_{max} = 15$ мс, веса возбуждающих синапсов в диапазоне (0, 3) мВ, тормозных – в диапазоне (–3, 0) мВ. Шум: пуассоновская последовательность спайков, средняя частота 400 Гц, вес шумовых спайков 2,8 мВ для возбуждающих нейронов и 0,8 мВ для тормозных нейронов.

Для анализа активности модели сети нейронов регистрировались спайки 500 нейронов, выбранных случайным образом. Если просуммировать общее количество спайков регистрируемых нейронов в ячейках времени по 1 мс (разрешение по времени в NEST равно 0,1 мс), то можно получить профиль популяционной пачки активности – т. е. график суммарной активности сети нейронов с течением времени.

На рис. 1 показан усредненный профиль пачек активности для модели сети со статичными синапсами. График получен выравниванием отдельных пачек по пиковому значению активности (которому присваивается время 0 мс) и вычислением среднего значения (пунктирная линия), а также 7,5 и 92,5 перцентилей (нижняя и верхняя сплошные линии) профилей активности всех зарегистрированных пачек. Для модели сети со статичными синапсами все пачки обладают очень схожими профилями, поэтому среднее значение и перцентили практически совпадают.

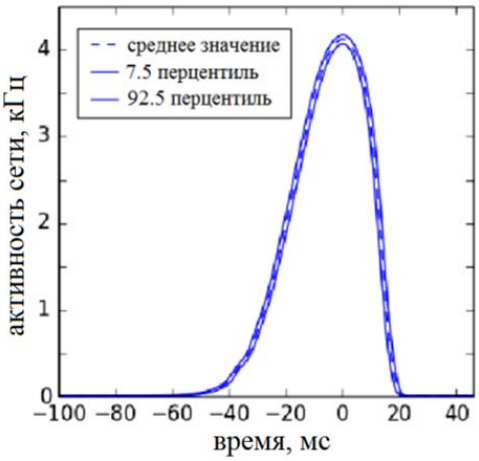


Рис. 1. Усредненный профиль пачек активности для модели культуры нейронов со статичными синапсами

Затем были исследованы модели культуры нейронов с пластичными синапсами. Параметры модели STDP: $\alpha = 1{,}1$ (1,05 в [9]), $\tau_+ = \tau_- = 20$ мс [9], $W_{max} = 3{,}0$ мВ. Основным предметом исследования являлось влияние параметра λ на активность модели культуры нейронов, при этом значения λ выбирались в широком диапазоне значений (таблица 1).

Таблица 1

	Номер культуры			
	1	2	3	4
λ	$1\cdot10^{-2}$	$1\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-4}$
	Номер культуры			
	5	6	7	8
λ	$1\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-6}$	$1\cdot10^{-7}$	$1\cdot10^{-8}$

Для каждого из вариантов модели культуры было осуществлено по 3 реализации с одинаковыми статистическими значениями параметров модели, но с разными значениями генератора случайных чисел.

Исследуемые модели культур с разными значениями λ можно разделить на три основных группы по динамике спонтанной пачечной активности.

1 группа: $1\cdot10^{-2} \le \lambda \le 1\cdot10^{-3}$ (культуры № 1 и 2). Установившийся профиль пачек активности в течение короткого времени (несколько первых секунд симуляции) изображен на рис. 2. Следует заметить, что в данном случае пиковое значение активности (10 кГц) сохраняется на протяжении около 10–40 мс. Это означает, что на протяжении 10–40 мс все нейроны сети были активны на каждом шаге времени (0,1 мс). В экспериментальных данных культур нейронов *in vitro* пиковая амплитуда пачек не превышает 7–8 кГц [7].

2 группа: $3 \cdot 10^{-4} \le \lambda \le 1 \cdot 10^{-4}$ (культуры № 3 и 4). В данном, достаточно узком, окне значений параметра λ профиль пачек активности сходился к профилю, изображенному на рис. 3 – сериям из 2 – 3 последовательных пачек разной амплитуды. Пиковые значения профиля активности, а также длительности этих пачек согласуются с экспериментальными данными культур нейронов *in vitro* [1, 7], однако парные или тройные пачки, как правило, *in vitro* не возникают [1].

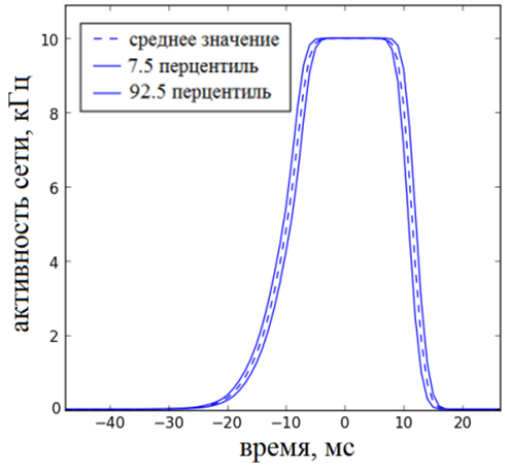


Рис. 2. Усредненный профиль пачек активности для модели культуры нейронов с пластичными синапсами, $1 \cdot 10^{-2} \le \lambda \le 1 \cdot 10^{-3}$

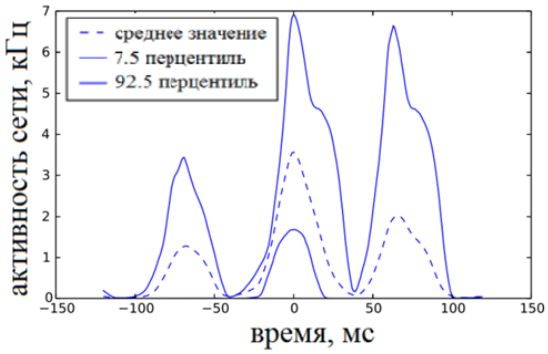


Рис. 3. Усредненный профиль пачек активности для модели культуры нейронов с пластичными синапсами, $3 \cdot 10^{-4} \le \lambda \le 1 \cdot 10^{-4}$

Кроме того, существенным рассогласованием с экспериментальными данными пачечной активности моделей культур нейронов групп 1 и 2 является строгая периодичность спонтанных пачек активности, следующих друг за другом через промежутки времени около 400–600 мс. Из экспериментов известно, что межпачечные интервалы распределены в широком диапазоне значений от десятков миллисекунд до сотен секунд [1].

3 группа: $1 \cdot 10^{-5} \le \lambda \le 1 \cdot 10^{-8}$ (культуры № 5–8). В данном случае пачки активности сохраняют форму профиля пачек модели культуры со статичными синапсами (см. рис. 1), при этом амплитуда профиля сначала некоторое время незначительно возрастает, а затем постепенно снижается до значений порядка 10–100 Гц. Такая низкая пиковая активность выходит за пределы значений активности популяционных пачек [7] – от 1 кГц – следовательно, ее можно отнести к фоновой активности сети. Стоит отметить, что с уменьшением параметра λ пачечная активность присутствует дольше, например для $\lambda = 1 \cdot 10^{-5}$ пачки активности присутствуют в течение первой секунды активности модели, а затем пропадают, для $\lambda = 1 \cdot 10^{-6}$ – в течение первых минут, для $\lambda = 1 \cdot 10^{-7}$ – не более часа, для $\lambda = 1 \cdot 10^{-8}$ пачки активности сохраняются в течение нескольких первых часов.

В таблице 2 представлены достигнутые в экспериментах значения внутреннего времени моделей нейрональной культуры.

Таблица 2

Номер культуры	Максимальное внутреннее время модели (сутки – часы – минуты – секунды)		
1	00-00-02-00	00-00-02-00	00-00-02-00
2	00-00-02-00	00-00-02-00	00-00-02-00
3	00-00-07-30	00-00-06-00	00-00-07-00
4	00-00-01-10	00-00-01-10	00-01-56-40
5	00-16-47-30	02-02-05-30	01-00-55-10
6	00-16-15-30	01-17-51-30	01-03-28-00
7	01-12-34-20	01-13-07-30	01-23-39-00
8	02-03-30-06	00-19-40-11	02-03-41-41

Для моделей сетей с относительно большой величиной λ ($1 \cdot 10^{-2} \le \lambda \le 1 \cdot 10^{-4}$, культуры № 1–4) время вычисления достаточно мало по той причине, что установившаяся пачечная активность демонстрировала стабильные повторяющиеся паттерны, и вероятность дальнейшего изменения данного типа активности мала.

Для моделей культур группы 3 ($1 \cdot 10^{-5} \le \lambda \le 1 \cdot 10^{-8}$, культуры № 5–8) были проведены долгосрочные эксперименты моделирования в попытке обнаружить появление популяционных пачек спонтанной активности после их угасания в первые часы вычислений. Однако вычисления активности модели культуры нейронов вплоть до начала третьих суток внутреннего времени модели не привели к возникновению пачек спонтанной активности.

Заключение

Спонтанные пачки активности модели культуры со статичными синапсами согласуются с экспериментальными данными активности культур нейронов *in vitro* по внутрипачечным характеристикам (амплитуде пачек, длительности), однако неизменность весов синапсов, отсутствие пластичности, не позволяет считать данную модель достоверной по отношению к культуре нейронов.

При добавлении синапсам свойства долговременной пластичности ни один из установившихся режимов спонтанной активности модели культуры не может быть полностью согласован с экспериментальными данными активности культур нейронов *in vitro*. В случае относительно большой величины мгновенных изменений синаптического веса ($1 \cdot 10^{-2} \le \lambda \le 1 \cdot 10^{-3}$) амплитудное значение профиля пачки выходит за пределы экспериментальных данных, в случае $3 \cdot 10^{-4} \le \lambda \le 1 \cdot 10^{-4}$ спонтанные пачки возникают сериями из двух-трех

пачек, что нетипично для активности культур нейронов *in vitro*. В случае же небольших мгновенных изменений весов синапсов ($1 \cdot 10^{-5} \leq \lambda \leq 1 \cdot 10^{-8}$) пачки спонтанной активности постепенно пропадают.

Вполне возможно, что изначальное случайное совокупное распределение синаптических весов и задержек распространения спайков по связям является неустойчивым, и в результате постепенных синаптических изменений при малом λ ($1 \cdot 10^{-5} \leq \lambda \leq 1 \cdot 10^{-8}$) данное распределение нарушается, возбуждающие синапсы чаще ослабляются, чем усиливаются, и постепенно возбуждающих токов в сети становится недостаточно для поддержания пачечной активности.

Существует вероятность того, что со временем некоторые последовательности связей после перераспределения синаптических весов будут усиливаться и это приведет к появлению спонтанных пачек активности, однако данных эффектов не возникало в течение достаточно продолжительных периодов времени, рассмотренных в настоящей работе. Скорее всего, возбуждающим синапсам сложно усиливаться из-за общего снижения активности сети, вызванного тем, что веса тормозных нейронов остались относительно большими, с распределением, присутствовавшим в начальный момент времени, потому что правило пластичности STDP в рассматриваемом виде применимо только к возбуждающим синапсам.

Возможно, рассмотрение моделей культуры нейронов, состоящих полностью из возбуждающих нейронов или с ослабленными весами тормозных нейронов позволит получить такой тип активности, в котором можно будет наблюдать постепенное возникновение популяционных пачек спонтанной активности.

Литература

1. *Wagenaar D.A., Pine J., Potter S.M.* An extremely rich repertoire of bursting patterns during the development of cortical cultures // BMC Neuroscience. 2006. Т. 7, № 1. P. 11.

2. *Chiappalone M. et al.* Dissociated cortical networks show spontaneously correlated activity patterns during in vitro development // Brain Research. 2006. Т. 1093, № 1. P. 41–53.

3. *Shahaf G. et al.* Order-based representation in random networks of cortical neurons // PLoS Computational Biology. 2008. Т. 4, № 11. P. e1000228.

4. *Kermany E. et al.* Tradeoffs and constraints on neural representation in networks of cortical neurons // The Journal of Neuroscience. 2010. Т. 30, № 28. P. 9588–9596.

5. *Shahaf G., Marom S.* Learning in networks of cortical neurons // The Journal of Neuroscience. 2001. Т. 21, № 22. P. 8782–8788.

6. *Nava I., Tessadori J., Chiappalone M.* Change of Network Dynamics in a Neuro-robotic System // Biomimetic and Biohybrid Systems. Springer International Publishing, 2014. P. 225–237.

7. *Gritsun T.A. et al.* Network bursts in cortical cultures are best simulated using pacemaker neurons and adaptive synapses // Biol. Cybern. 2010. V. 102. P. 293–310.

8. *Gütig R. et al.* Learning input correlations through nonlinear temporally asymmetric Hebbian plasticity // The Journal of Neuroscience. 2003. Т. 23, № 9. P. 3697–3714.

9. *Song S., Miller K.D., Abbott L.F.* Competitive Hebbian learning through spike-timing-dependent synaptic plasticity // Nature Neuroscience. 2000. Т. 3, № 9. P. 919–926.

10. *Gewaltig M.-O., Diesmann M.* NEST (NEural Simulation Tool) // Scholarpedia. 2007. V. 2, № 4. P. 1430.

11. *Izhikevich E.M. et al.* Simple model of spiking neurons // IEEE Transactions on Neural Networks. 2003. Т. 14, № 6. P. 1569–1572.

12. *Orlandi J.G. et al.* Noise focusing and the emergence of coherent activity in neuronal cultures // Nature Physics. 2013. Т. 9, № 9. P. 582–590.

Развитие и применение методов мультифрактального анализа для исследования ЭЭГ в состоянии фона и медитации

Л.А. Дмитриева[1], Д.А. Зорина[2], Ю.А. Куперин[1],
А.И. Мурышкина[3], Н.М. Сметанин[1]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет
[2] ООО «Докми», Санкт-Петербург
[3] АНООДО «Оксфорд», Санкт-Петербург

Работа посвящена анализу временных рядов электроэнцефалограмм (ЭЭГ) в состоянии фона и медитации методами мультифрактального анализа. С когнитивной точки зрения особый интерес представляет влияние медитации на мозг. Получаемые результаты активно используются также в медицинских целях [1]. Существует множество различных медитативных практик, которые можно разделить на три группы [2], а именно: акцентированное внимание (focused attention), открытый мониторинг (open monitoring), автоматическое самопреодоление (automatic self-transcending). В настоящей работе испытуемые, для которых записывались ЭЭГ, имели различный опыт в практике медитации типа открытый мониторинг (open monitoring). Всего в базе данных имелись записи ЭЭГ 45 испытуемых в состоянии фона и медитации. ЭЭГ в состоянии фона – это запись в спокойном состоянии испытуемого с закрытыми глазами. ЭЭГ в состоянии медитации – это запись, которая начиналась после того, как испытуемый подавал сигнал нейрофизиологам о входе в состояние медитации. При записи ЭЭГ использовалась международная конвенция 10–20 расположения электродов на скальпе, т. е. запись ЭЭГ проводилась по 19 каналам (электродам). Все испытуемые были разделены на 2 группы: опытные медитаторы (более 3000 часов медитативной практики) и неопытные медитаторы (менее 300 часов медитативной практики). Целью работы было нахождение количественных различий между группами опытных и неопытных испытуемых, практикующих медитацию, на основании многоканальных записей ЭЭГ. Методом анализа был выбран метод мультифрактальных спектров, которые количественно могли бы статистически достоверно описывать природу временных рядов ЭЭГ. Для достижения цели работы был решен ряд промежуточных задач: сбор данных и их предобработка; определение мультифрактальных характеристик и их статистическая обработка. В ходе исследования нами был выведен ряд характеристик, которые ранее не использовались при анализе временных рядов ЭЭГ. Было принято решение вычислять две количественные характеристики: 1) расстояние от центра мультифрактального спектра до его левого конца, т.е. ширину левого хвоста спектра; 2) расстояние от центра мультифрактального спектра до его правого конца спектра – ширину правого хвоста. Подробно значение этих характеристик описано ниже.

Сведения о мультфрактальных спектрах

При определении фрактала основной идеей Бенуа Мандельброта было выделение объектов, обладающих самоподобием, т. е. таких, часть множества которых в определенном смысле подобна всему множеству. Другими словами, такие множества являются масштабно инвариантными. Это означает, что, выделяя часть множества и изменяя масштаб соответствующим образом, мы получаем множество в точности либо статистически совпадающее с исходным множеством. Можно показать, что для фрактальных объектов выполняется следующее соотношение:

$$N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D_0},$$

где $N(\varepsilon)$ – число элементов покрытия с размером ε, содержащее точки рассматриваемого множества, а D_0 – фрактальная размерность множества. Такая степенная зависимость называется скейлингом. Регулярный фрактал, который описывается единственным универсальным параметром D_0, называют монофракталом.

Мультифрактал – это неоднородный фрактальный объект, для полного описания которого, в отличие от регулярных фракталов, недостаточно введения всего лишь одной величины, его фрактальной размерности D_0, а необходим целый спектр таких размерностей, число которых неограниченно. Под мультифрактальными объектами, как правило, понимают мультифрактальные меры, распределенные на определенном геометрическом носителе. Для описания таких мер используют мультифрактальный формализм, существующий в нескольких вариантах [3–5]. Опишем один из них.

Используем, как и в случае монофрактала, метод покрытия [3]. Все пространство, которое занимает объект, разбивается кубиками размера ε. Вероятность того, что наугад взятая точка попала в ячейку с номером i, обозначим через p_i. Другими словами, вероятность p_i характеризует относительную заселенность ячейки. В случае однородного фрактала во всех ячейках будет содержаться одинаковое количество точек, следовательно относительная заселенность ячейки тоже будет одинаковой. Если мы будем рассматривать мультифрактальную меру, то p_i будет соответствовать точке на этой мере. Введем так называемую функцию разбиения, характеризующуюся

показателем степени q, который может принимать любые целые значения:

$$Z(q,\varepsilon)=\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon),$$

и величину, называемую скейлинговой функцией:

$$\tau(q)=\lim_{\varepsilon\to 0}\frac{\ln\left(Z(q,\varepsilon)\right)}{\ln\varepsilon}.$$

Тогда весь спектр фрактальных размерностей, или спектр фрактальных размерностей Реньи, описывается выражением [6]

$$D_q=\frac{\tau(q)}{q-1}=\lim_{\varepsilon\to 0}\frac{1}{q-1}\cdot\frac{\ln\left(\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon)^q\right)}{\ln\varepsilon}.$$

Можно показать [3], что если D_q не зависит от q, то множество точек представляет собой монофрактал.

Как правило, работать удобнее не с переменными D_q и q, а с так называемым мультифрактальным спектром $f(\alpha)$ для переменной α, которая является показателем Липшица – Гельдера для мультифрактальной меры.

Переход от переменных $\tau(q)$ и q к переменным $f(\alpha)$ и α осуществляется с помощью преобразования Лежандра:

$$\alpha=\frac{d\tau}{dq},\quad f(\alpha)=q\cdot\frac{d\tau}{dq}-\tau(q);$$

$$q=\frac{df}{d\alpha},\quad \tau(q)=\alpha\cdot\frac{df}{d\alpha}-f(\alpha).$$

Можно показать [7], что величина $f(\alpha)$ фактически равна хаусдорфовой размерности некоторого однородного фрактального подмножества из исходного множества, которое дает доминирующий вклад в статистическую сумму при заданном q. Поскольку фрактальная размерность подмножества всегда меньше либо равна размерности исходного множества, то $f(\alpha)\le D_0$. Можно показать также [3], что функция $f(\alpha)$ является всюду выпуклой для мультифрактала.

Мультифрактальный спектр, полученный вышеописанным способом, называется спектром Лежандра, так как для его получения используется преобразование Лежандра. На рисунке 1 показан типичный вид функции мультифрактального спектра и характерные точки. Максимум этой функции есть фрактальная размерность носителя меры D_0.

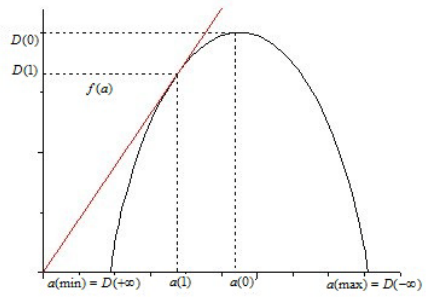


Рис. 1. Типичный вид мультифрактального спектра

Значениям α_{max} и α_{min} соответствуют размерности Реньи $D_{-\infty}$ и $D_{+\infty}$ соответственно. Заметим, что значения $f(\alpha_{max})$ и $f(\alpha_{min})$ не обязаны равняться нулю. При этом максимум функции мультифрактального спектра $D(0)$ совпадает с фрактальной размерностью носителя меры D_0. Очевидно, что в рассматриваемом случае, поскольку носителем мультифрактальной меры является отрезок, то D_0=1.

Результаты анализа записей ЭЭГ методом мультифрактального анализа

Выборка испытуемых состояла из 10 человек, 5 из которых – опытные медитаторы, а 5 других – неопытные медитаторы. Частота записей многоканальных ЭЭГ равнялась 500 Гц. ЭЭГ писались в двух состояниях: «фон» и «медитация». Для каждого канала ЭЭГ каждого испытуемого вычислялись мультифрактальные спектры и две их характеристики. Для обработки полученных результатов использовался статистический анализ, а именно: выделялось по 10 отрезков длиной в 1000 отсчетов. Отрезки брались по всем 19 отведениям. Таким образом, для одного испытуемого составлялось 190 отрезков для каждого состояния и для каждого отведения. Далее обработка результатов вычислений проводилась методом ANOVA с повторениями в пакете STATISTICA (градациями внутреннего фактора STATE являлись измерения в состоянии «фона» и «медитации»).

Результаты исследования мультифрактальных спектров

Как видно из рис. 2, как для опытных, так и для неопытных испытуемых, ширина правого хвоста мультифрактального спектра меньше в состоянии медитации, чем в фоне. Однако взаимодействие факторов STATE и Type присутствует (*p*-уровень практически равен нулю), то есть изменения в двух состояниях для опытных и неопытных испытуемых количественно существенно различны. Это же подтверждает апостериорный тест для парных сравнений (см. табл. 1).

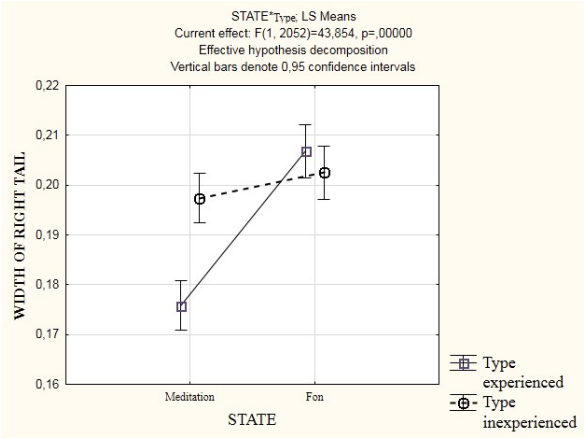


Рис. 2. Ширина правого хвоста спектра в зависимости от состояния и типа испытуемых

Он показывает, что для опытных испытуемых уменьшение ширины правого хвоста в медитации статистически значимо, $p < 0,01$ (см. *p*-уровни в ячейках табл. 1 с номерами 21 и 12). В то же время для неопытных испытуемых это уменьшение ширины правого хвоста мультифрактального спектра статистически незначимо, $p > 0,01$ (см. *p*-уровни в ячейках 43 и 34).

Таблица 1

Результаты апостериорного теста
для парных сравнений по правому хвосту

Cell No.	LSD test; variable DV_1 (amax-a0 repeated) Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between; Within; Pooled MS = ,0072, df = 3427,8					
	Type	STATE	1 0,176	2 0,207	3 0,197	4 0,202
1	exper	Med		**0,000**	0,000	0,000
2	exper	Fon	**0,000**		0,011	0,241
3	inexper	Med	0,000	0,011		**0,064**
4	inexper	Fon	0,000	0,241	**0,064**	

Также интересно отметить, что в состоянии медитации правый хвост мультифрактального спектра у опытных испытуемых статистически значимо уже, чем у неопытных (см. *p*-уровни в ячейках 31 и 13 табл. 1). В состоянии фона это различие статистически незначимо.

Полученные статистические результаты при исследовании правого хвоста мультифрактального спектра, а именно величины $f(\alpha_{max}) - f(\alpha_0)$, позволяют сделать следующие выводы. С нейрофизиологической точки зрения это, по-видимому, означает, что у опытных медитаторов в состоянии медитации происходит синхронизация больших нейронных ансамблей.

При исследовании левого хвоста мультифрактального спектра, характеризуемого величиной $f(\alpha_0) - f(\alpha_{min})$, мы получаем отсутствие взаимодействия факторов STATE и Type (p > 0,01). Как видно из рис. 3, как для опытных, так и для неопытных испытуемых, ширина левого хвоста мультифрактального спектра больше в состоянии медитации, чем в состоянии фона. Предварительные исследования на стилизованных данных, а именно на биномиальной мере, показывают, что добавление шума приводит к сужению левого хвоста мультифрактального спектра в зависимости от уровня шума: чем больше уровень шума, тем уже левый хвост. Таким образом, наши результаты для реальных сигналов показывают, что как у опытных, так и у неопытных испытуемых в состоянии медитации уровень физиологического шума в больших ансамблях нейронов статистически значимо снижается.

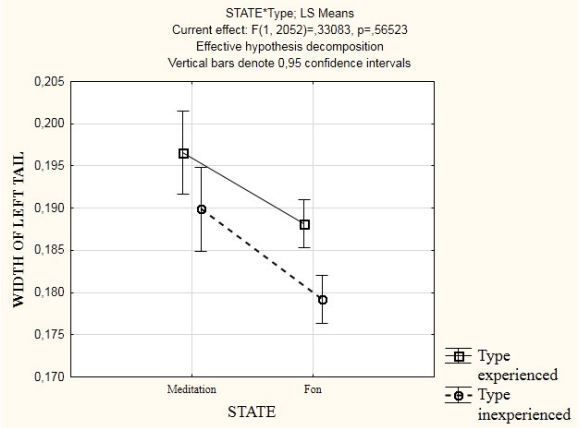


Рис. 3. Ширина левого хвоста спектра в зависимости от состояния и типа испытуемых

Как показывает апостериорный тест для парных сравнений (табл. 2), как для опытных, так и для неопытных испытуемых увеличение ширины левого хвоста мультифрактального спектра в состоянии медитации по сравнению с фоном статистически значимо, $p < 0,01$ (см. *p*-уровни в ячейках 21 и 12, а также в ячейках 43 и 34).

Таблица 2

Результаты апостериорного теста
для парных сравнений по левому хвосту

Cell No.	LSD test; variable DV_1 (a0-amin repeated repeated) Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between; Within; Pooled MS = 0 ,0044 df = 4032,5					
	Type	STATE	1 0,197	2 0,188	3 0,190	4 0,179
1	exper	Med		**0,002**	0,020	0,000
2	exper	Fon	**0,002**		0,562	0,002
3	inexper	Med	0,020	0,562		**0,000**
4	inexper	Fon	0,000	0,002	**0,000**	

Отметим также, что как в фоне, так и в медитации левый хвост у неопытных испытуемых уже, чем в соответствующих состояниях у опытных испытуемых. Однако здесь этот факт статистически значим лишь при $p < 0,05$ (см. *p*-уровни в ячейках 31 и 13, а также в ячейках 42 и 24).

Литература

1. *Braboszcz C., Habusseau S., Delorme A.* Meditation and Neuroscience: from basic research to clinical practice // Integrative Clinical Psychology, Psychiatry and Behavioral medicine: Perspectives, Practices and Research / editor R. Carlstedt. Springer Publishing, 2010. P. 1910–1929.

2. *Travis F., Shear J.* Focused attention, open monitoring and automatic self-transcending: categories to organize meditations from Vedic, Buddhist and Chinese traditions [Электронный ресурс] // Consciousness and cognition. 2010. P. 45–68. URL: www.elsevier.com/locate/concog.

3. *Божокин С., Паршин Д.* Фракталы и мультифракталы. М. : R&C Dynamics, 2001. 128 с.

4. *Макаренко Н.Г.* Фракталы, мультифрактальные меры и аттракторы // Нелинейные волны' 2002. Ниж. Новгород, 2003. С. 381.

5. *Falconer K.* Fractal Geometry. Mathematical Foundations and Applications. Wiley, 2003. 337 p.

6. *Безручко Б.П., Смирнов Д.А.* Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов : ГосУНЦ «Колледж», 2005. 320 с.

7. *Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б.* Современные проблемы нелинейной динамики. М. : Едиториал УРСС, 2002. С. 249.

Изучение EMD-разложений сигналов ЭЭГ методом локальных показателей разбегания на реконструированных аттракторах

Л.А. Дмитриева[1], Д.А. Зорина[2], Ю.А. Куперин[1], С.С. Чепилко[3]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет
[2] ООО «Докми», Санкт-Петербург
[3] Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова (НИТИ), г. Сосновый Бор, Ленинградская область

Целью настоящей работы являлась количественная проверка следующей гипотезы относительно структуры динамических составляющих сигнала электроэнцефалограммы (ЭЭГ): сумма первых двух мод EMD-разложения сигнала ЭЭГ является физическим и физиологическим шумом.

Для проверки этой гипотезы проводилась декомпозиция зарегистрированного многоканального сигнала ЭЭГ с помощью метода EMD [1]. Далее было проведено исследование каждой моды EMD-разложения и самого сигнала методом, предложенным авторами в [2], суть которого состоит в вычислении локальных показателей разбегания (ЛПР) траекторий на реконструированном аттракторе с помощью комитета нейронных сетей. Несмотря на некоторые общие моменты, метод работы [2] в корне отличается от нейросетевого метода [3] оценки старшего показателя Ляпунова и всего дискретного спектра традиционно вводимых ляпуновских показателей и направлен на изучение распределения локальных показателей разбегания траекторий на той части аттрактора, который может быть реконструирован по изучаемому короткому временному ряду.

Исследование характера гистограмм распределений ЛПР и ряда их усредненных характеристик, дополненное информацией о качестве обучения нейронных сетей в комитете, как было показано в [2] на модельных временных рядах, является достаточно эффективным средством выявления природы рассматриваемого временного ряда. Будучи примененным к изучению мод EMD и самого сигнала ЭЭГ, указанное исследование позволило получить результаты, представленные в настоящей работе. Было показано, что сумма первых двух мод представляет в различных каналах сигнала ЭЭГ физический и физиологический шум. В настоящей работе из-за недостатка места мы не приводим результаты относительно других мод EMD-разложения сигналов ЭЭГ.

Попытки исследовать временные ряды ЭЭГ методами динамического хаоса предпринимались в большом количестве работ (см., например, [3–10]). Однако однозначного результата о характере динамики временных рядов ЭЭГ получено не было [8, 9]. В этих работах было показано, что вычисление старшего ляпуновского показателя для самого сигнала ЭЭГ и суррогатного сигнала различаются незначительно и, следовательно, ляпуновский показатель не может служить мерой хаоса в ЭЭГ.

Метод локальных показателей разбегания

Опишем кратко метод идентификации режима динамической системы, порождающей временной ряд, на основе изучения локальных показателей разбегания (ЛПР) траекторий на реконструированном аттракторе, предложенный в работе [2]. На первом шаге реализации метода происходит обучение комитета нейронных сетей, каждая из которых является, например, 4-слойным персептроном. Применяется алгоритм Левенберга – Марквардта, который, как известно, хорошо работает на коротких временных рядах. В комитет включаются только те сети, для которых множественный коэффициент регрессии R^2 больше определенного порога и ошибка обучения сети меньше фиксированного значения MSE (Mean Square Error). Каждая сеть содержала m входов и m выходов, где m – размерность пространства вложения (см., например, [11]) изучаемого временного ряда. Каждая сеть училась аппроксимировать отображение $X_{t+\tau}^{(m)} = F(X_t^{(m)})$. Здесь x_t – это точка изучаемого ряда, $X_t^{(m)} = (x_t, x_{t-\tau}, ..., x_{t-(m-1)\tau})$ – точка на реконструированном аттракторе в m-мерном лаговом пространстве с лагом τ. Каждая обученная сеть использовалась далее в следующих вычислениях: для каждой точки ряда x_t формировался многошаговый прогноз вектора $X_t^{(m)} = (x_t, x_{t-\tau}, ..., x_{t-(m-1)\tau})$ на определенный горизонт вперед. Этот прогноз рассматривался как кусок опорной траектории на реконструированном аттракторе. Далее строились N случайных возмущений вектора $X_t^{(m)}$, многошаговый прогноз которых с помощью обученной сети на h шагов вперед давал пучок возмущенных траекторий в лаговом пространстве. Для каждой точки ряда x_t количество возмущенных точек $\tilde{X}_t^{(m)} = (\tilde{x}_t, \tilde{x}_{t-\tau}, ..., \tilde{x}_{t-(m\mp1)})$ в лаговом пространстве определялось соображениями представительности статистики, и в приведенных ниже результатах это число равнялось 250. Возмущение компонент вектора $\tilde{\tilde{X}}_t^{(m)}$ задавалось с помощью генератора случайных чисел, по модулю не превышающих 10^{-7}.

Для каждого номера итераций прогнозы усреднялись по всем нейронным сетям комитета. В каждый комитет отбиралось по 10 нейронных сетей.

Далее для каждого номера итерационного прогноза вычислялись *m*-мерные расстояния между точками на опорной траектории и усредненными по комитету нейронных сетей возмущенными траекториями и строились линейные регрессии логарифмов указанных расстояний относительно номеров прогнозов. Для каждой точки ряда, определяющей опорную траекторию, количество построенных регрессий равнялось числу возмущенных траекторий в пучке. Отбирались лишь регрессии, для которых стандартная ошибка оценки наклона регрессионной прямой оказывалась меньше фиксированного порога. Значения наклонов λ так отобранных регрессионных прямых для всех точек ряда и всех возмущений объединялись в единую выборку, характеризующую изучаемый срез аттрактора, и по ней строилась гистограмма распределения локальных показателей разбегания траекторий λ изучаемого временного ряда.

В качестве изучаемых временных рядов были рассмотрены записи многоканальных электроэнцефалограмм здоровых людей с открытыми и закрытыми глазами. Международной федерацией электроэнцефалографии и клинической нейрофизиологии рекомендуется стандартная схема размещения электродов на поверхности головы – система «10–20 %» [12]. В нашем исследовании использовались записи электроэнцефалограмм всех 19 отведений длиной 1500 отсчетов (с 10000-го отсчета от начала записи). Так как частота записи составляет 500 Гц, используются отрезки записи длиной 3 секунды. На рис. 1–4 представлены графически результаты для испытуемого с условным именем Arx для канала Fp2 с закрытыми глазами.

Результаты анализа записей ЭЭГ методом ЛПР

Используемые в исследовании электроэнцефалограммы были предобработаны: очищены от артефактов, которые неизбежно возникают при записи ЭЭГ. Основным результатом настоящей работы является установление следующих фактов. Шум – беспорядочные колебания неизвестной природы – содержится в нескольких первых модах EMD-разложения. Для записей ЭЭГ с закрытыми глазами шум – это первые две моды. В случае с открытыми глазами шумом могут быть и первые три моды, так как с открытыми глазами человек получает и обрабатывает гораздо больше информации. Закономерно, что и уровень шума в таком случае повышается. Предлагаемый метод и разработанный на его основе алгоритм были протестированы на модельных временных рядах [13]. Мы называем ряды модельными, поскольку для каждого ряда была известна динамическая система, породившая тот или иной модельный ряд, или было известно, что временной ряд случаен. Длина каждого ряда выбиралась равной 1500 отсчетам. Если модельный ряд порожден хаотической динамической системой, то, как показано в [13], все ЛПР для него положительны. В этой же работе было показано, что если временной ряд случайный (например, белый шум), то все ЛПР отрицательны. В настоящей работе мы показываем следующее. Оценивая совокупность факторов, используемых в данной работе для классификации временных рядов ЭЭГ, можно подтвердить, что сигнал, составленный из первых двух (трех) мод, является шумом. Достаточно рассмотреть это на одном примере – сумме первых двух мод записи ЭЭГ испытуемого Arx с закрытыми глазами, отведения Fp2. Для остальных каналов записей ЭЭГ и других испытуемых первые две (три) моды демонстрируют аналогичное поведение. Сигнал обладает широким спектром мощности (рис. 1), нейронные сети показывают невысокое качество обучения: $R^2 = 0{,}764$, MSE = 0,021, по каждой из сетей среднее значение ЛПР отрицательно (рис. 2), суммарный спектр ЛПР значительно сдвинут в отрицательную сторону (рис. 3).

Таким образом, мы показали, что EMD-фильтрация в комбинации с методом ЛПР позволяет надежно выделять физический и физиологический шум в сигналах ЭЭГ и при необходимости этот шум удалять. Заметим также, что суммарный спектр ЛПР (рис. 4) для сигнала ЭЭГ, не разложенного в моды EMD, распределился симметрично

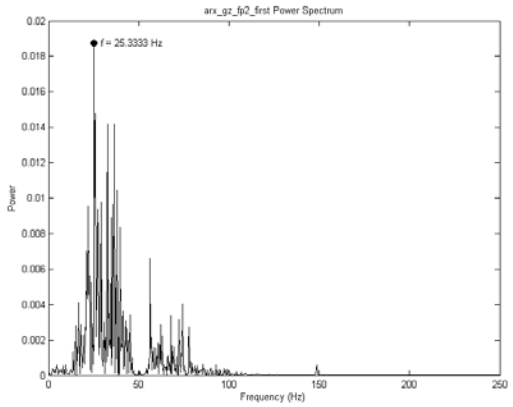


Рис. 1. Спектр мощности суммы первых двух мод записи ЭЭГ испытуемого Arx с закрытыми глазами, отведения Fp2

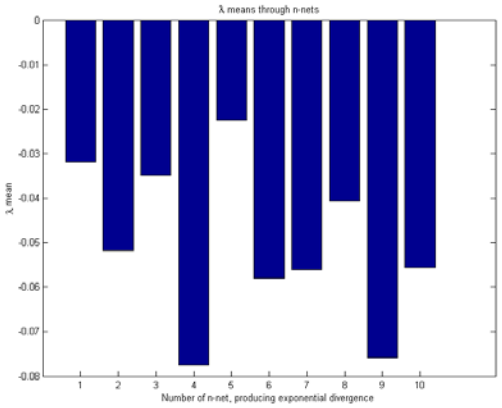


Рис. 2. Средние значения ЛПР по сетям для суммы первых двух мод записи ЭЭГ испытуемого Arx с закрытыми глазами, отведения Fp2

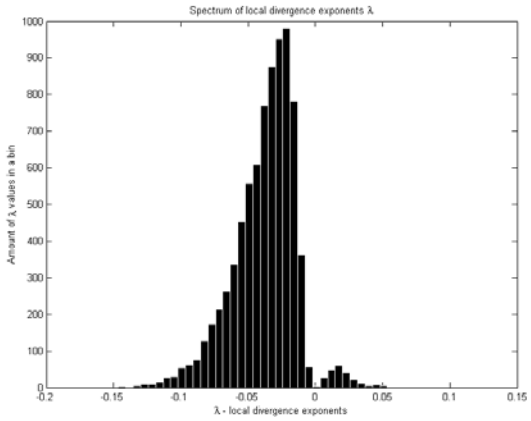


Рис. 3. Суммарный спектр ЛПР для суммы первых двух мод записи ЭЭГ испытуемого Arx с закрытыми глазами, отведения Fp2

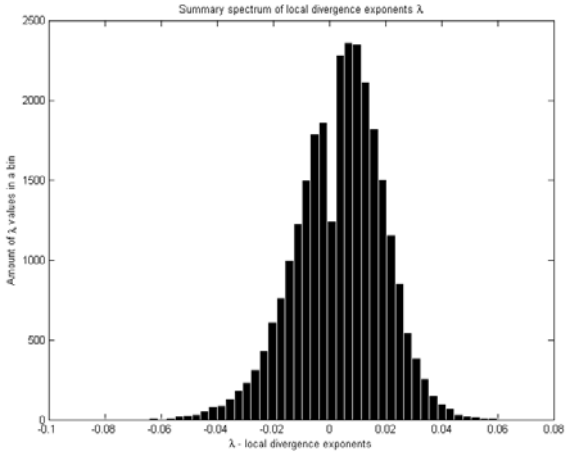


Рис. 4. Суммарный спектр ЛПР для суммарного сигнала записи ЭЭГ испытуемого Arx с закрытыми глазами, отведения Fp2

относительно нуля, т. е. нет явного преобладания положительных или отрицательных значений ЛПР. Такой результат не позволяет сделать заключение о детерминированности (хаотичности или квазипериодичности) или случайности сигналов ЭЭГ и требует дальнейших исследований.

Литература

1. *Huang N.E. et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non stationary time series analysis // Proc. Royal Soc. London A. 1998. V. 454. P. 903–995.
2. *Дмитриева Л.А., Чепилко С.С., Черных Г.А.* Применение искусственных нейронных сетей для исследования локальных свойств реконструированных аттракторов временных рядов // IPRT Working paper. 2009. № 227-09, 10 p.
3. *Головко В.А.* Нейросетевые методы обработки хаотических процессов // Нейроинформатика-2005 : VII Всероссийская научно-техническая конференция : лекции по нейроинформатике. М. : МИФИ, 2005. С. 43–91.
4. *Roschke J., Fell J., Mann K.* Non-linear dynamics of alpha and theta rhythm: correlation dimensions and Lyapunov exponents from healthy subject's spontaneous EEG // Int. J. Psychophysiology. 1997. V. 26, № 1. P. 251–261.
5. *Pradhan N., Sadasivan P.K.* The nature of dominant Lyapunov exponent and attractor dimension curves of EEG in sleep // Computers in Biology and Medicine. 1996. V. 26, № 5. P. 419–428.
6. *Chia L.C., Shin D.S., Chaovalitwongse W.A., Pardalos P.M., Sackellares J.C.* Presence of nonlinearity in intracranial EEG recordings: detected by Lyapunov exponents // AIP Conf. Proc. Data Mining, Systems Analysis and Optimization in Biomedicine. 2007. V. 953, № 5. P. 197–205.
7. *Stam C.J.* Nonlinear dynamical analysis of EEG and MEG: review of an emerging field // Clin. Neurophysiol. 2005. V. 116(10). P. 2266–2301.
8. *Porcher R., Thomas G.* Estimating Lyapunov exponents in biomedical time series // Phys. Rev. E. 2001. V. 64. P. 010902–010906.
9. *Das A., Das P., Roy A.B.* Applicability of Lyapunov exponent in EEG data analysis // Complexity International. 2002. V. 9. P. 1–8.
10. *Palus M.* Nonlinearity in normal human EEG: Cycles and randomness, not chaos // Biological Cybernetics. 1996. V. 75(5). P. 389–396.
11. *Kantz H., Schreiber T.* Nonlinear time series analysis. Cambridge : Cambridge University Press, 1997. 275 p.
12. *Tatum W.O. et al.* Handbook of EEG interpretation. Demos Medical Publishing, 2008. 276 p.
13. *Chepilko S., Dmitrieva L., Kuperin Yu.* Application of Artificial Neural Networks to Study the Properties of Reconstructed Attractors of Time Series // Proc. 2nd Int. Conf. "Stochastic Modeling Techniques and Data Analysis", Chania, Crete, Greece, June 5–8, 2012. 2012. P. 95–101.

О проблемах, возникающих при попытках интеграции гуманитарных и естественно-научных подходов к изучению когнитивных процессов

А.М. Дорожкин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Во-первых, хотелось бы отметить, что вопрос, рекомендуемый к обсуждению на конференции ее программным комитетом, – об отсутствии или присутствии проблематики – в вышеупомянутой теме, как нам представляется, просто излишний. Излишний по той причине, что проблематично здесь практически все. Начнем хотя бы с того, что проблематичным сегодня является само выявление гуманитарных наук, даже в плане их простого отличения от естественно-научных направлений. Ведь один из разделов биологии, дисциплины по всем признакам естественно-научной, посвящен изучению человека. Если же под тем, что мы считаем человеческим, т. е. гуманитарным, понимать лишь духовную составляющую человека, то мы тем самым отбросим себя со своею проблемой в XIX век, когда В. Дильтей проводил классификацию наук «по предмету», т. е. науки о природе и науки о духе, выделяя тем самым специфику гуманитарного знания. Примерно в том же духе специфика гуманитаристики представлялась и В. Виндельбанду. Он, в отличие от Дильтея, классификацию проводил не по предмету, а по методу. Но объединяет их взгляды то, что в обоих случаях утверждалось серьезное различие, доходящее до противоречия между гуманитарным и естественно-научным знаниями. Разумеется, ни о какой интеграции между ними речи быть не могло. В дальнейшем, с развитием философской герменевтики, пропасть между естественно-научным и гуманитарным еще более увеличилась благодаря заявлению о том, что естествознание призвано ОБЪЯСНЯТЬ, а гуманитарные науки – ПОНИМАТЬ. В принципе, такому течению мысли не стоит удивляться, потому что любое исследование любого нового феномена (а таким стало гуманитарное знание) всегда начинается с выявления его различий, т. е. отличий от того, что известно более, нежели оно. Это во-первых. А во-вторых, в задании программного комитета конференции речь идет не о гуманитарном знании, а о подходах гуманитарного знания к изучению познавательных процессов. Конечно, без выявления специфики гуманитарного знания говорить о специфике его подходов тяжеловато. Именно поэтому отмеченное выше определенный смысл все же имеет. Однако не будем далее распространять рассуждения в этом русле хотя бы потому, что на интуитивном уровне отличить гуманитарное знание от естественно-научного можно. Ограничимся этим уровнем и рассмотрим, разумеется весьма приблизительно, какие подходы к анализу когнитивных процессов имеют место в естествознании и гуманитарных науках.

Если говорить о естествознании, то исследование познавательных процессов началось с возникновением и развитием кибернетики в XX веке. Оставим при этом без внимания рассуждения о способностях андроидов и древних вычислительных машинках. После первых выводов Н. Винера исследования были продолжены по направлениям развития искусственного интеллекта, нейрокибернетики, бионики и другими смежным с ними направлениями. При этом общая задача для всех этих направлений заключалась, прежде всего, действительно в поиске ОБЪЯСНЕНИЯ феномена познания. Тут уж ничего не отнимешь. Задача ПОНИМАНИЯ была, но была как бы вторичной. Понимание возможно было на основе объяснения, и только.

Если же обратиться к гуманитарным наукам, то нам удобнее всего, конечно, за пример гуманитарного знания взять философию. Здесь опять нужно оговориться, что, по нашему (и не только по нашему) мнению, философия не есть наука. Философия есть гуманитарное знание, но не научное гуманитарное знание. О специфике подходов гуманитарного научного знания к когнитивным процессам мы говорить не можем просто потому, что не являемся специалистами в этой теме. Ну, а в философии наиболее интересной, по нашему мнению, является ныне точка зрения М. Фуко. Таковой она является хотя бы потому, что он, в отличие от других, не делает различия между естественно-научным и гуманитарным знаниями, но наоборот, подчеркивает их сходство. Правда, такое сходство имеет место, согласно Фуко, лишь в определенные периоды развития истории науки. Периоды эти он называет эпистемами, и мы здесь кратко отметим особенности современной эпистемы, пришедшей на смену классической.

Конец классической эпистемы связан с высвобождением из поля представления живой природы и потребности и появлением новых объектов познания – языка, жизни, труда. Основным способом бытия эмпирических данных, причем это не обязательно естественно-научные данные, теперь становится история (одновременно и как область знания, и как история становления и развития изучаемых объектов), а не порядок, как это было в классическую эпоху. В результате этих изменений появляются новые области знания – филология, биология, политическая экономия.

Анализируя причины смены эпистем, Фуко подчеркивает, что они отнюдь не связаны с возрастанием уровня рациональности, совершенствованием моделей формализации, открытием новой темы в культуре. Причины этого события кроются

в отношении представления к тому, что в нем дается: представления об отношении вещи и слова об этой вещи. Вещи замыкаются сами на себе, их внутреннее пространство внешне по отношению к нашему представлению. Но при этом так же, как и в предыдущих эпистемах, разницы между отношениями слов и объектов, которые они обозначают, нет независимо от того, какого свойства объекты, т. е. принадлежат они области гуманитарных или естественно-научных исследований.

Распад пространства представления привел к возникновению новых форм мысли: об условиях отношения между представлениями и об условиях возможности объективного познания живых существ, законов производства, форм языка на основе таких понятий-представлений, как *жизнь*, *труд*, *язык*. Попросту говоря, в классической эпистеме основным способом бытия предметов познания было пространство. В нем упорядочивались тождества и различия. В современной эпистеме основной способ бытия – время. Соответственно, история, антропология и конечность развития выступают как внешнее отображение сложившейся эпистемы.

Одной из самых главных характеристик современной эпистемы, по Фуко, считается появление в ней человека. Он вынужден трудиться, для того чтобы обеспечить свое существование, и он начинает понимать это. Знание предшествующих эпох не могло помыслить человека, несмотря на то что уделяло ему привилегированное место во Вселенной. В классической эпистеме, по мнению Фуко, невозможность появления человека объясняется тесной связью бытия и представления. В точке их соприкосновения, там, где встречается природа вообще и человеческая природа, возникает дискурсия, т. е. язык в его способности выражать представления о вещах и их выражениях в словах. Именно здесь становится возможным, по Фуко, появление человека одновременно как познавательного объекта и познающего субъекта. Человек необходимо появляется в замкнутом круге, образуемом живыми существами, предметами обмена и словами. Человек подчинен жизни, труду, языку, так как познать его можно только через его организм, его слова и производимые им предметы. С появлением человека, которого одновременно следует помыслить и познать, в европейской культуре становятся возможными гуманитарные науки в полном смысле этого слова. Пространство гуманитарных наук, по Фуко, определяется их отношением к биологии, экономике и филологии: в результате выделяются «психологическая», «социологическая» области и область исследования мифов и литератур.

С появлением гуманитарных наук и определением их места в эпистемологическом пространстве появляется возможность более конкретно определить и методологию гуманитарных наук. По мнения Фуко, они используют три типа моделей в процессе познания:

– формализацию в обычном ее понимании;

– перенос понятий из другой области познания с целью наглядно представить какое-либо явление, процесс и т. д.;

– модели, заимствованные из биологии, анализа языка, экономики, в роли «категорий».

В проекции на каждую из этих моделей человек выявляется определенным образом – через функцию и норму (биология), конфликт и правило (экономика), значение и система (анализ языка).

На основе этих трех моделей Фуко предлагает рассматривать историю гуманитарных наук с XIX века. Он пишет о поочередном приоритете каждой из этих моделей. Одновременно с этим происходил сдвиг внутри каждой из этих моделей – от функции к норме, от конфликта к правилу, от значения к системе.

Современную эпистему Фуко описывает как трехмерное пространство: «в одном измерении располагаются физические и математические науки, в другом – науки о языке, о жизни, о производстве и распределении богатств, стремящиеся к упорядочиванию прерывных, но сходных элементов; в третьем – философская рефлексия, которая «развертывается» как мысль о Тождестве».

Гуманитарные науки нельзя обнаружить ни в одном из этих измерений, они находятся в том объеме, который очерчен этими тремя измерениями – отсюда сложность задачи определения их места в эпистемологической области. С точки зрения Фуко, гуманитарные науки вырисовываются как позитивные конфигурации, которые, однако, не являются науками, что объясняется их особым положением, которое и делает возможным их существование.

Таким образом, человек как основной объект гуманитарного знания предстает не как объект науки, а как некая позитивная область знания. А следовательно, в какой-то мере избавившись от имевшейся ранее дихотомии объяснения и понимания, Фуко вновь, по-другому, но вновь ставит проблему взаимоотношения между гуманитарным и естественно-научным знанием, но в другой плоскости.

Означает ли это, что нам нужно раз и навсегда оставить попытки навести мосты между гуманитарным и естественно-научным знаниями? По нашему мнению, попытки должны быть продолжены. Нам представляется, что неопределенными до конца остались еще наши представления о сути объяснения и понимания теперь уже в плоскости представлений о гуманитарном, предложенных Фуко. Возможно, недостающие нам сведения следует искать не только в области философии. Нам хотелось бы обратить внимание представителей конкретных наук – прежде всего психологии и нейрофизиологии – на эту проблему.

О необходимости разработки гипотезы о квантово-механической модели процесса работы полимераз и рибосом при синтезе биополимеров ДНК/РНК и белков

А.А. Драницына

Исследователь, tss2061@yandex.ru, +7-905-665-0560, Нижний Новгород

Данная гипотеза касается физической основы функционирования естественного сознания – молекулярных машин. Она может быть также интересна разработчикам искусственных систем, имитирующих человеческое сознание или предназначенных для его сохранения.

В гипотетической модели предложен принцип работы органических макромолекул на примере РНК/ДНК-полимераз и рибосом. Синтезирующие молекулярные машины – полимеразы, рибосомы и другие подобные макромолекулы – являются катализаторами в реакции полимеризации.

Задуматься о необходимости квантово-механического описания процесса заставляет несоответствие между случайной и хаотичной природой броуновского движения, предлагаемого в качестве объяснения для способа доставки мономерного «сырья» к месту реакции, в сочетании с большим количеством степеней свободы в системе, с одной стороны, и невероятной стабильностью реакции и по скорости и по точности, с другой стороны.

На каждом отдельном шаге машина активирует к реакции один из нескольких разносортных мономеров в зависимости от полимера-образца. И если полимераза собирает цепочку по заданной образцом последовательности из 4 вариантов мономеров, то рибосома – уже приблизительно из 20, а за счет вырожденности кода образца число задействованных вариантов вообще вырастает до 60.

Избирательность катализатора обеспечивается относительно небольшим изменением в общей конструкции – задействованием разных по составу участков полимера-образца в универсальной синтезирующей машине. Однако полимер-образец, судя по данным 3-мерной структуры машины, в момент реакции находится внутри макромолекулы и изолирован от свободных прямых столкновений, т. е. необходимо учитывать ориентацию молекул в 3-мерном пространстве относительно друг друга – конструкции с мономерами собираемой цепи должны подходить к машине в определенной пространственной ориентации со строго определенной стороны. Для неподходящих на данном шаге мономеров нужен механизм эвакуации. Но о наличии направляющих или о предварительной подготовке соответствующих мономеров до входа в молекулярную машину мне не известно. То есть выбор из 4–60 вариантов и доставка следующего реагента в машину происходит единовременно, на шаге реакции. И все это в 3-мерном жидком пространстве. Со стабильными скоростями в десятки и сотни шагов в секунду. А ошибки составляют доли процента [1. С. 121, табл. 6.1].

Надежность напоминает стабильную работу, например, транзисторов, где квантово-механическое описание для процессов успешно используется. Скорость и стабильность квантово-механических процессов соотносится с вероятностью местонахождения частицы и описывается плотностью вероятности. Кроме того, в квантово-механических расчетах пространственная ориентация молекулы, в какую сторону повернут, например, антикодон, не будет иметь такого решающего значения, как для модели прямых столкновений в ньютоновской механике. Данные о квантово-механическом, скачкообразном изменении варианта конформации молекул уже имеются [2].

Ниже будут изложены детали гипотетической модели.

Предполагается, что ядра атомов и электроны, составляющие макромолекулу, могут рассматриваться отдельно, как относительно независимые объекты (это явное допущение для целей моделирования), и уравнения для определения функции плотности вероятности в зависимости от координат могут решаться для каждой частицы отдельно. Качественная картина возможной плотности вероятности для компонента молекулы приведена на рис. 1.

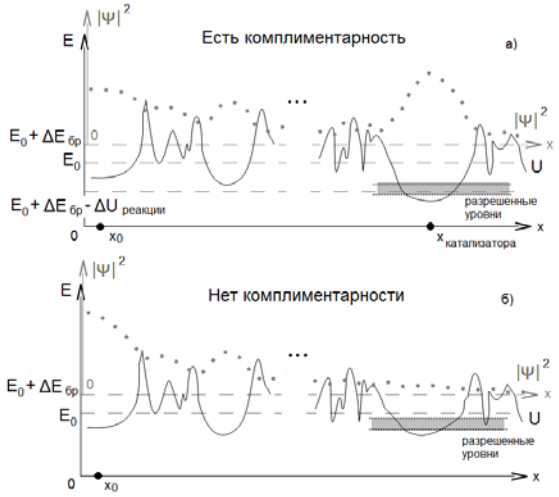


Рис. 1. Модельная картина потенциального барьера и плотности вероятности для элементарного компонента макромолекулы, задействованного в химической реакции. x_0 – координата начального положения компонента; $x_{\text{катализатора}}$ – точка возможной реакции; $E_0 + \Delta E_{\text{бр}}$ – постоянная и переменная составляющие энергии частицы в начальной точке; функция U – изображение потенциального профиля, составленного препятствиями на пути перемещения; $\Delta U_{\text{реакции}}$ – потенциальная энергия химической реакции; функция $|\Psi|^2$ – плотность вероятности частицы-компонента макромолекулы, электрона или ядра атома, в зависимости от координаты.

Ширина пиков потенциального профиля, вероятно, составляет величину порядка размера ядра

атома. Сами пики должны размываться вследствие неопределенностей в местоположении компонентов атомов. Так как атомы и молекулы в целом электрически нейтральны, пики имеют конечную высоту/глубину.

Потенциальный профиль и функция плотности вероятности изображены очень приблизительно и усредненно. Рисунок качественный, и масштаб расстояний и размеров может быть нарушен. Вероятно, что на каких-то участках траектории волновая функция может демонстрировать колебания, а в потенциальных ямах могут быть задействованы решения порядка выше первого, однако здесь такие детали опущены.

Сами макромолекулы предполагается рассматривать как облака составляющих частиц, синхронно передвигающихся в пространстве (см. возможный график плотности вероятности для макромолекулы на рис. 2). Плотность вероятности для молекулы представляется функцией от согласованных волновых функций ее синхронно перемещающихся компонентов.

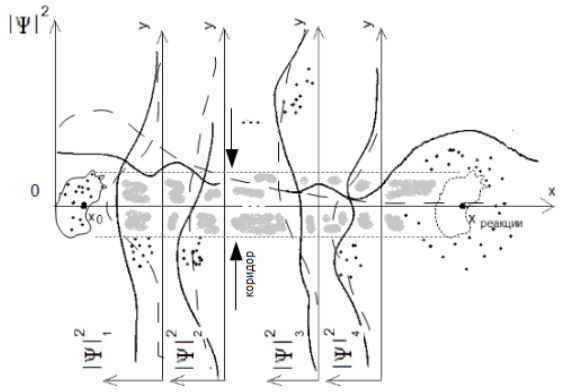


Рис. 2. Гипотетическая картина плотностей вероятности для реагирующей молекулы $|\Psi|^2$ и молекул на траектории перемещения $|\Psi|^2_1$, $|\Psi|^2_2$ и т. д. Пунктир – плотности вероятности при отсутствии условий для реакции, сплошные линии – в момент наличия условий для реакции

Предполагается, что волновые функции коррелируют, и частицы на траектории движения смещаются в пределах своих плотностей вероятности, образуя коридор между начальным положением молекулы x_0 и местом реакции $x_{\text{реакции}}$ для продвижения реагирующей молекулы.

Такое рассмотрение имеет смысл из-за наличия массы частиц в формулах, дающей существенную разницу для случая рассмотрения составляющих частиц и в разы более тяжелого макрообъекта, а также из-за взаимодействия близких по размеру и сложных по форме объектов, каковыми являются реагирующая макромолекула и выступающие в качестве препятствий прочие молекулы в жидкой среде клетки, вследствие чего реагирующую молекулу все равно нельзя рассматривать как точечный объект. Тогда пересечение траекторий молекул должно быть похоже на прохождение одного облака частиц через другое, где каждый составляющий облако элемент самостоятельно преодолевает свои препятствия.

Молекулы, образующие потенциальный барьер между начальным положением реагирующего мономера и конечной точкой, также находятся в жидкости, в подвижном состоянии, и их местоположение также можно описывать функцией плотности вероятности. Это понижает высоту создаваемого ими барьера, так как препятствия имеют возможность «подвинуться» в пределах свободы своих волновых функций.

В качестве основы модели предполагается использовать решение стационарного уравнения Шредингера в одномерном пространстве. Набора стационарных решений для компонентов молекулы должно быть достаточно для оценки возможности или невозможности осуществления реакции с данной конкретной молекулой в данный момент времени. Поправка на отличие жидкой среды от идеальной модели вакуума будет состоять в наличии потенциального профиля, описывающего препятствия на линии между начальным положением молекулы, вступающей в реакцию, и местом реакции. По форме потенциальный профиль может представлять собой, например, вариант 2 потенциальных ям, разделенных потенциальным барьером, или вообще простой вариант свободной частицы, преодолевающей потенциальный барьер.

Локальный максимум вероятности местонахождения внутри катализирующей молекулярной машины, видимо, формируется только для подходящего на данный момент сорта молекул.

Известно, что специфичность к сорту компонента реакции задается возможностью образования химической связи с активным звеном полимера-образца. Решения уравнения волновой функции в потенциальной яме дают энергетические уровни для возможных состояний частиц. И в ходе химической реакции электроны размещаются по соответствующим энергетическим уровням. Видимо, на месте реакции образуется потенциальная яма. А образец корректирует «чистые» уровни молекулярной машины рибосомы или полимеразы, чтобы они сочетались с нужными молекулами и конфликтовали с остальными. Потенциальную энергию химической реакции $\Delta U_{\text{реакции}}$, возможно, следует прямо включать в потенциальный профиль в точке $x_{\text{катализатора}}$. Тогда можно предполагать, что для подходящего сорта молекул формируется относительно глубокая потенциальная яма и решения волновой функции сопрягаются с доступными уровнями в катализаторе (рис. 1, *а*). А для остальных сортов, которым разрешенные в данный момент уровни не подходят, заметной потенциальной ямы и локального максимума плотности вероятности, соответственно, не формируется (рис. 1, *б*). В то же время пространственная структура молекулярной машины жестко фиксирует объем пространства, достаточный для физического размещения нужной молекулы, ограждая пространство реакции от случайных посторонних молекул (рис. 2). Таким образом достигается низкая частота ошибок.

Так как высокой специфичности оказывается достаточно в небольшой части молекулы, остальная часть макромолекулы, предположительно, двигается уже просто как часть синхронно перемещающегося облака частиц.

В экспериментальных условия система должна демонстрировать некоторый *эффективный радиус* $r_{эф}$ вокруг местоположения катализатора, в пределах которого потенциальный барьер, так или иначе создаваемый различными препятствиями для продвигающейся к месту реакции частицы, преодолим. Учитывая заранее низкую точность модели, возможно, что для части приложений вообще будет достаточно рассматривать некий единый усредненный потенциальный профиль, усредненно дающий аналогичный эффект.

Теорию броуновского движения также можно задействовать в описании процесса – для оценки характеристик источника импульса и частично энергии для перемещения молекулы (см. $\Delta E_{бр}$ на рис. 1). Долю пригодных для целевого перемещения случайных броуновских импульсов можно определить через величину их проекции на рассматриваемое направление.

Для описания процесса перемещения компонентов к месту реакции можно предложить, как минимум, два подхода. Один подход – когда перемещение описывается как мгновенный квантовый скачок. Второй – когда плотность вероятности будет использована для определения потенциала «разницы вероятности» в месте начального положения реагирующего мономера по сравнению с местом реакции. Такой потенциал, в свою очередь, дает «вектор силы», действующей на мономер в нужном направлении, позволяя ему двигаться прямо по траектории, постепенно, но неуклонно преодолевая препятствия.

Область применения данной гипотезы в когнитивных исследованиях определяется тем, что нейронная сеть в живом организме, в том числе у человека, постоянно преобразуется физически, изменяется в процессе жизнедеятельности сознания. Новые связи в нейронной сети создаются, лишние разрываются физически, закрепляя архитектуру сети. Меняются физические параметры отдельных связей. Процесс изменения физического носителя ежедневный. И меняют нейронную сеть, несомненно, молекулярные машины. А если молекулярные машины используют в своей работе квантово-механические принципы, это значит, что естественная когнитивная система принципиально квантово-механическая, пусть и на низком уровне, на уровне физических элементов. Квантово-механические принципы могут быть даже задействованы в принятии решений, как и что менять в нейронной сети, какие связи добавлять, какие разрывать. Могут влиять и на оперативную деятельность сознания.

В частности, вопрос о возможности оцифровки сознания на классических цифровых компьютерах не может быть принципиально решен без определенности относительно данной гипотезы. Потому что если гипотеза верна, то и эмулировать биологическую среду должно будет не просто квантовое устройство, но устройство с аналогичными квантово-механическими свойствами. Иначе, в общем случае нужно предполагать другие скорости реакций, другие временные характеристики, другую причинность событий на самом нижнем элементном уровне – и, в общем случае, другие параметры функционирования для сознания в макросистеме. То есть, вероятно, уже существенно другое сознание.

Создание как программной, так и аппаратной реализации полноценного искусственного носителя сознания, создание эмуляторов сознания, если гипотеза верна, не может обходить стороной вопрос о достаточной точности воспроизведения квантово-механических свойств биологической системы в искусственном исполнении. Здесь понадобятся дополнительные исследования. Ведь квантовая механика сейчас дает только статистическое описание, но механизм реализации выбора, механизм разрешения неопределенности в каждом конкретном случае не имеет пока объяснений даже для простых объектов, а такой механизм в общем случае должен давать различные результаты для сколь-нибудь физически различных систем.

Положительный результат исследования гипотезы, если таковой будет, пригодится и для различного рода манипуляций с естественными биологическими средами. Для неинвазивных методов лечения естественного объекта или ремонта искусственного и т. п. Так, в принципе должно быть возможно заменять воздействие молекулы-катализатора аналогичным по действию катализирующим излучением, квант энергии которого эквивалентен поправке к «чистым» энергетическим уровням реагентов со стороны катализирующей молекулярной машины. Условия для реакции будут созданы на траектории прохождения кванта или пакета квантов подходящего спектрального состава, а меняя частоты излучений, было бы можно провоцировать разные реакции. Также можно попробовать поманипулировать составляющими среду веществами с расстояния «эффективного радиуса», используя «*направленную диффузию*», выводить ненужные соединения.

Приглашаю всех заинтересованных в результате проверки гипотезы к сотрудничеству. К сожалению, очевидно, что даже численный расчет модели будет затруднителен, не говоря уже о подборе точных формул. Но можно рассчитывать найти экспериментальное подтверждение.

Полимеразы и рибосомы – относительно удобный экспериментальный объект, в том числе и благодаря возможности создания искусственного полимера-образца с заданной последовательностью, а значит, с хорошо-предсказуемым содержанием эксперимента. Реакции с полимеразами и рибосомами распространены повсеместно, присутствуют во множестве в каждой живой клетке, давно освоены в обращении в лабораторной практике и легко воспроизводятся, что также должно упростить выделение материала для экспериментов.

Литература

1. *Жимулев И.Ф.* Общая и молекулярная генетика : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Новосибирск : Сиб. унив. изд-во, 2003. 479 с.; ил.

2. *Воробьев А.Х.* Лекции по теории элементарного акта химических реакций в конденсированной фазе // Лекции химического факультета МГУ. 2000. Лекция 5. URL: http://www.chem.msu.su/rus/teaching/vorob%27ev/5.html.

Асимптотическое упорядочивание поведения слабосвязанной системы автономных агентов на основе модели зеркальных нейронов

А.И. Евтушенко

Криворожский национальный университет, Кривой Рог

Введение

«Зеркальные нейроны» (mirror neurons) – гипотетический механизм автоматического *понимания* субъектом содержания действий, совершаемых не им самим, исследуется в нейропсихологии более двух десятилетий, прежде всего усилиями G. Rizzolatti [1]. Однако эта идея не востребована в кибернетике – ни в моделях artificial life (AL), ни в других классах многоагентных систем (МАС). Представляется, что затруднение вызывает, во-первых, интерпретация многомерных явлений высшей нервной деятельности в понятиях «Флатландии» автоматического управления и, во-вторых, видимое отсутствие класса задач, для которых mirror neurons в архитектуре МАС может стать основой решения.

Однако при разработке модели artificial life на основе двойственного восприятия (two faced perception, TFP) [2] можно увидеть, что здесь механизм зеркальных нейронов естественно воспроизводится в форме репликации специфической для TFP «реакции выбора», автоматически генерируя неиерархическую МАС с групповым поведением (горизонтальная система, она же система с распределенной ответственностью).

Оба утверждения нуждаются в пояснении.

1. Определения

Модель двойственного восприятия. В основе модели с TFP – императив выживания (аналог целевой функции), восприятие отдельно всех положительных и отдельно всех отрицательных к императиву факторов (собственно TFP), сценарии – модели детерминированных реакций агента на два противоположных образа среды – аналог рефлексов (рис. 1) – и завершающая – реакция *выбор*, не связанная с предусловиями или содержанием сценариев [2].

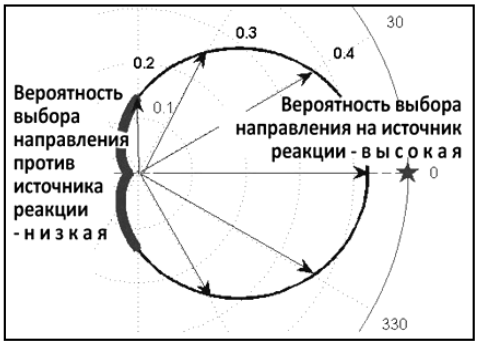


Рис. 1. Эпюра аспектов приемлемого правдоподобия. Агенту предлагается две случайные, но предопределенные реакции (бегство – погоня), каждая из которых содержит ненулевую вероятность обратной реакции

В совокупности это позволяет для воспроизведения сложного поведения использовать систему простых навыков, приобретаемых по одному. Причем уже полученный навык переопределяется в сценарий, в «рефлекс», используемый далее автоматически. Например, сначала агент обучается определять свое положение в лабораторной системе координат [3]. Затем, когда навык позиционирования переопределен в сценарий, целью обучения становится, например, реакция вроде «приблизиться – удалиться» или более сложные.

Такой подход допускает: 1) единообразную технологию обучения на всех этапах (это всегда выбор между двумя предлагаемыми реакциями); 2) возможность пропустить обучение любому навыку, особенно тривиальному, заменяя его готовым сценарием, дистрибьютор которого – «экспериментатор» либо *другие обученные агенты*.

Уточним: «обучение» здесь означает как процесс индивидуального обретения навыка, так и «селекцию». В обоих случаях основой является подходящая процедура генерации кортежей альтернативных вариантов действий, предъявляемых агенту, таких, что многократное повторение реакции «выбор», позволит сформировать «навык». Иначе прогрессивная эволюция МАС будет практически невозможна.

Для иллюстрации, между упомянутой процедурой и обретенным «навыком» отношение примерно такое же, что и между классом и объектами этого класса.

С другой стороны, если процедура получения вариантов уже сконструирована, с ней можно рассматривать разные «технологии» обучения или вовсе *никакие*. Кроме того, при обучении агенты все равно делают *случайный* выбор между предлагаемыми вариантами, что эквивалентно тривиальной генерации случайных чисел.

Таким образом, суждение о предложенной выше интерпретации зеркальных нейронов можно сделать отдельно от собственно процесса обучения (эволюции).

Горизонтальные МАС. Для многоагентной самоорганизующейся системы, если она и впрямь «многое, мыслимое как единое», принципиальным является способ, которым достигается это единство. Разнообразные реализации этих способов можно свести к двум: во-первых, к иерархической структуре с выделенными для управления агентами или ансамблями агентов и, во-вторых, к горизонтальной, слабосвязанной структуре, которая как система, как целое воспринимается лишь со стороны. Целостность возникает вследствие суперпозиции отношений между участниками и ан-

самблями, являясь чем-то вроде коллективного бессознательного.

Здесь *горизонтальная система* созвучна, но не тождественна «горизонтальному предприятию» или «горизонтальному управлению», например в [4], так как в горизонтальной МАС принципиальным является как раз отсутствие всякого «центрального системного ядра», всякого «своего рода мозга».

Иерархическая структура де-факто знакома, изучена и тиражирована. Горизонтальная же традиционно воспринимается с определенным недоумением: "regem lucusta non habet et egreditur universa per turmas" – «у саранчи нет царя, но выступает она строем».

С позиций императива выживания горизонтальная система надежнее иерархической, так как если объект управления – система *в целом*, то при ее расширении требуется перестраивать и управление – уточнять коэффициенты подобия, реструктуризироваться, «переучиваться» или даже менять парадигму управления.

В горизонтальных же системах любого масштаба агенты обучаются одинаково, действуют одинаково, а система приобретает новые свойства как бы автоматически (в идеале). Если иерархия имеет тенденцию к обрушению структуры, схлопыванию, то «разрушить» стаю саранчи можно, лишь уничтожая ее поэлементно.

Представляется, что чем сложнее организованы отдельные агенты горизонтальной системы, тем очевиднее, какой именно механизм делает возможным их автоматическое объединение в единое, в стаю. Этот механизм – подражание.

2. Подражание и зеркальные нейроны

Условимся, понимать «подражание» как буквальное повторение, копирование агентом действий другого агента.

Будем считать «отображение» подражанием, но на основе *понимания* смысла действия, совершаемого агентом-образцом. И, разумеется, «понимание» не должно быть следствием некой рассудочной деятельности – «у саранчи нет царя...».

Чтобы избежать «танца с саблями» вокруг пограничной терминологии, примем как рабочую гипотезу: понимать – значит знать смысл действия (поднять мяч или уклониться от угрозы – действия разные по смыслу, но по *видимости* мало различимые).

Но если для подражания достаточно простого наблюдения, то для отображения необходим дополнительный механизм, который, похоже, реально присутствует в живых системах.

По сегодняшним представлениям, зеркальные нейроны – особый вид зрительно-двигательных нейронов (visiomotor), который активируется, когда субъект выполняет моторный акт, а также когда только наблюдает действие, выполняемое другим индивидуумом. Причем зеркальные нейроны кодируют *цель* двигательных актов, а не сами движения, что имеет следствием автоматическое понимание действия «путем простого наблюдения за действиями без умозаключений».

Можно оспаривать интерпретацию экспериментальных фактов и не принимать утверждение G. Rizzolatti, что именно механизм зеркальных нейронов есть «анатомическое свидетельство» связи между наблюдением действия и его пониманием. Но в любом случае очень сходный механизм объединения искусственных агентов в горизонтальную систему *придется* изобрести, придумать. Так почему бы не воспользоваться гипотезой зеркальных нейронов?.. Тем более за ней стоит весомый багаж наблюдений.

Таким образом, если показать, что копирование (по определенному алгоритму) реакции выбора в МАС на основе TFP действительно формирует некое подобие горизонтальной системы, такой алгоритм можно будет считать адекватной интерпретацией функционала зеркальных нейронов, причем на уровне простейших агентов, и одновременно иллюстрацией возможности практического применения mirror neurons.

3. Формулировка задачи

Применим методы имитационного моделирования МАС на основе TFP к задаче пересечения агентами некоего ограниченного пространства «терминала» (модели вольера, дебаркадера, платформы электропоезда или собственно *терминала*) с отражающими границами (рис. 2). Цель агентов – попасть в границы переходов и не попасть на заграждение. Последнее приводит к аннигиляции агента. Предполагается способность агента выделять из окружающей среды подобных себе и, если схема предусматривает, каким-то образом учитывать или использовать их отношения со средой в свою пользу. Хотя прямое «целеуказание» по принципу deus ex machina запрещено.

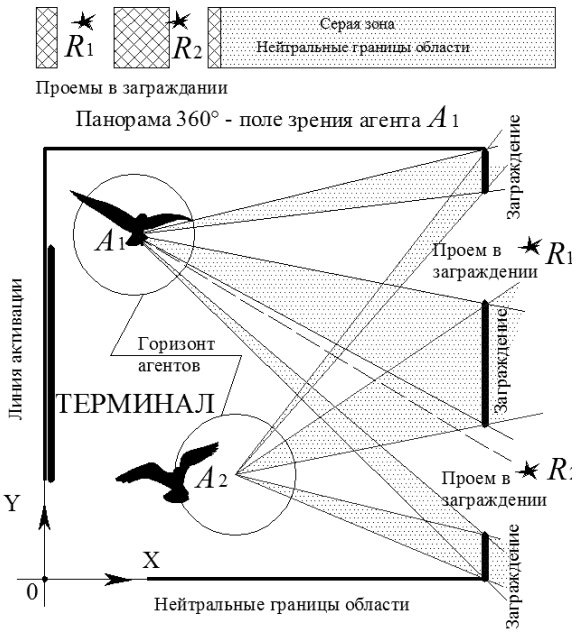


Рис. 2. Область моделирования

Движение агентов через терминал может иметь разные формы – рационализируясь от случайных блужданий до траектории прямого попадания. Хотя как раз траектория, путь не являются целью обучения. Цель – *результат* этого пути, «попадание – промах». Поэтому каждый отдельный шаг вообще не может быть оценен как «правильный – неправильный». Если обучение (селекция) агентов и приведет к 100 % попадания в цель, то это все равно будут *разные* траектории. Поэтому схемы моделирования сравниваются не по близости траекторий к геометрическому эталону, а по соотношению успехов и промахов и по числу итераций, шагов, которые пришлось сделать успешным агентам.

4. Упорядочивание потока

Под упорядочиванием здесь понимается динамическое, обоснованное задачей переформатирование потока дискретных агентов в конфигурацию менее вероятную, чем исходная.

Отказавшись от иерархической структуры, мы рассматриваем три «горизонтальные» схемы двигательного поведения: *F* – случайные перемещения (мухи, fly) – используется для сравнения, *M* – случайный выбор (мотыльки, moth), *G* – отображение – подражание *выбору* другого агента, то же, что подражание *смыслу* действия другого агента (чайка, gull). Схема *G* имитирует *использование* зеркального нейрона (способ конкретной реализации которого здесь не рассматривается).

При случайных перемещениях распределение аспекта по окружности равномерное, при случайном выборе аспект известен.

Среди множества правил для определения лидера выбран самый простой: им считается агент, имеющий к данной итерации моделирования наилучший результат (например, находящийся ближе других к переходу) или наилучший (но никогда – средний!) результат среди *K* ближайших соседей и др. Переопределение лидера происходит автоматически при изменении конфигурации.

5. Результаты моделирования

Программа для пошагового моделирования пересечения терминала позволяет воспроизвести поведение группы до 40 агентов на основе упомянутых схем. Некоторые статистические результаты испытаний представлены в таблице.

Результаты моделирования прохождения терминала группами (20×100 испытаний)

Схема	Итераций в одном испытании для прохождения терминала (в среднем)	Средняя вероятность	
		успеха	неудачи
F	473	0,43	0,57
M	225	0,71	0,29
G	118	0,77	0,23

От типа реализуемой схемы (*F, M, G*), кроме вероятности попадания в цель, зависит и число шагов, необходимых для такого попадания (рис. 3). Если при случайных блужданиях мы ожидаемо наблюдаем смешение двух распределений (отражает характер моделируемой «окружающей среды»), то в случайном выборе и схеме с лидером наблюдается последовательно большая упорядоченность при одинаковом виде распределения.

Кроме статистики, модель «Терминал» возвращает массив кадров для анимации, делающих отличие в схемах более наглядным (рис. 4, *а*), и треки не отдельных агентов, а геометрических центров их кластеров (рис. 4, *б*).

Другой способ демонстрации отличий между схемами – отметить на изображении терминала все пиксели, хотя бы раз посещенные агентами в одном испытании (рис. 4, *в*).

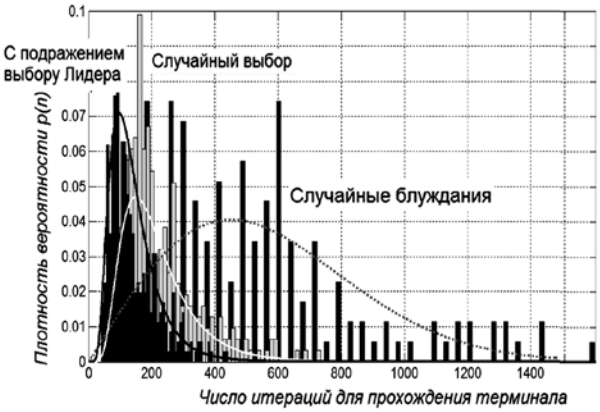


Рис. 3. Эмпирическое распределение зависимости числа итераций, необходимых успешному агенту для пересечения терминала

6. Обсуждение

1. Никакой уровень навыков агентов, обученных и обучаемых в данной группе по отдельности, не обуславливает автоматически повышение качества поведения группы. При этом увеличение числа агентов в группе ухудшает результат испытания группы в целом из-за «конфликта интересов» – создания взаимопомех из-за одинаково мотивированных решений.

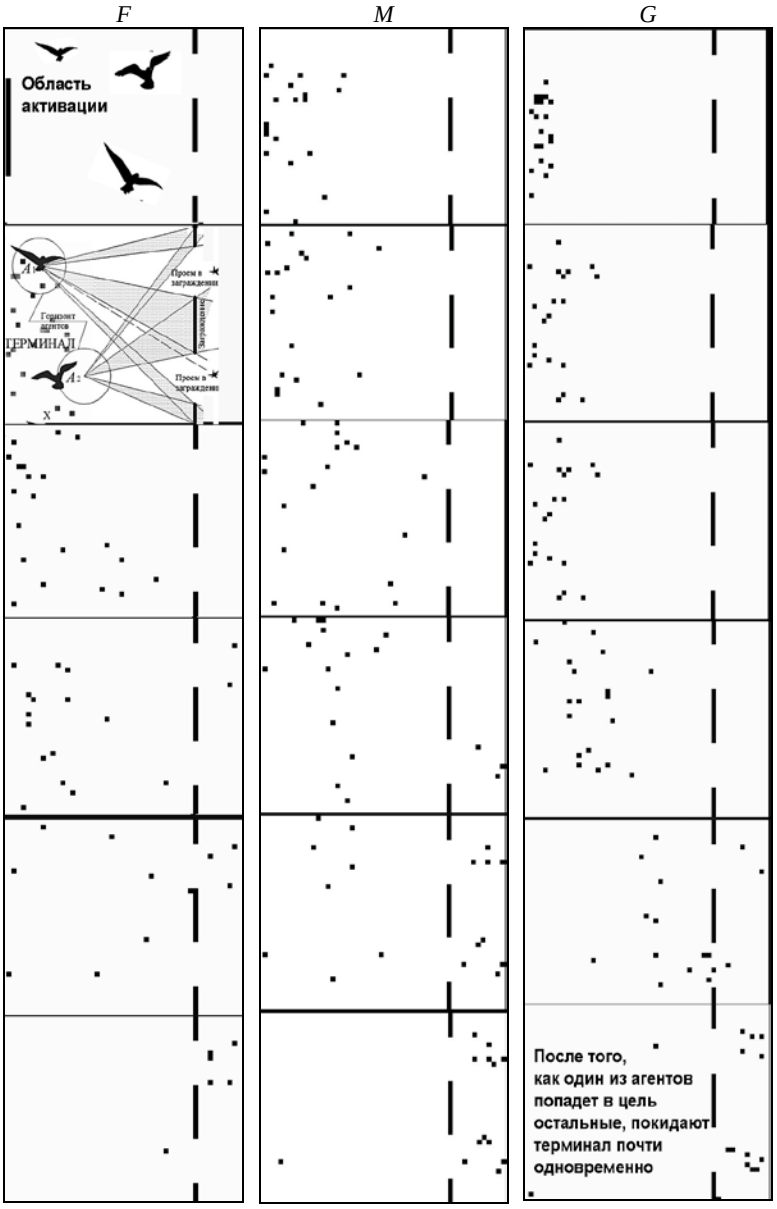
2. Поведение группы становится более качественным при наличии лидера, каковым автоматически оказывается любой агент, чье «решение», обеспечило ему наилучшую позицию из всех.

3. Увеличение численности группы с лидером статистически достоверно улучшает результаты испытания группы.

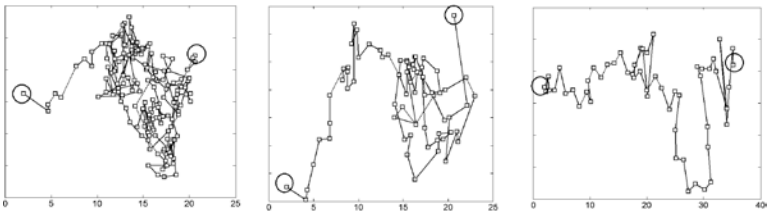
4. Обучение группы в целом не предусматривает принятие самостоятельного решения каким-либо агентом, кроме лидера.

5. Модели с лидером могут классифицироваться как: 1) схемы с подражанием – агенты повторяют (копируют) действия лидера, и 2) схемы с отображением (*G*) – агенты повторяют выбор (решение) лидера, но каждый использует собственные «навыки» и параметры.

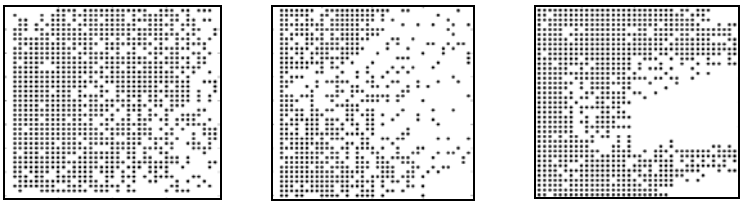
Схемы организации МАС



а) характер перемещения агентов в терминале (раскадровка видео [5])



б) трек центра самого большого кластера агентов



в) пиксели изображения терминала, посещенные агентами не менее 1 раза

Рис. 4. Характер перемещения агентов в терминале в одном испытании

6. Результат испытаний с *отображением* показывает признаки формирования группового поведения, сокращение среднего числа итераций на прохождение терминала и повышение успешности, которая с увеличением дистанции (или уменьшением шага моделирования) приближается к 100 %. Однако, когда группа в процессе испытания сокращается, заключительная часть трека формируется всего несколькими агентами (или часто одним). А так как в основе вероятностный механизм выбора направления, то в конце испытания схемы с лидером сводятся к обычному случайному выбору.

Вывод

Модели на основе двойственного восприятия (TFP) позволяют имитировать функцию зеркального нейрона, которая выражается здесь в использовании «выбора», сделанного другим, более «успешным» агентом, временным лидером. Схема с такой функцией может рассматриваться как горизонтальная система агентов, так как лидер не выполняет функций управления.

Литература

1. *Rizzolatti G., Fogassi L.* The mirror mechanism: recent findings and perspectives // Phil. Trans. R. Soc. B. 2014. V. 369. P. 20130420. URL: http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0420.

2. *Евтушенко А.И.* Фактор среды и алгоритмизация агентов в моделях artificial life // Восточно-Европейский Журнал передовых технологий. Харьков, 2012. № 3 (57). С. 23–32. URL: http://elibrary.ru/item.asp?id=19110523.

3. *Евтушенко А.И.* Лабораторная система навигации мобильных роботов // Нові технології. Кременчук : КУЕІТУ, 2008. №1 (19). С. 230–235.

4. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М. : Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.

5. Видео к докладу *Евтушенко А.И.* Асимптотическое упорядочивание поведения слабосвязанной системы автономных агентов на основе модели «зеркальных нейронов» [Электронный ресурс]. URL: http://youtu.be/6TZT3bA2m6Y.

Использование нейроэмуляторов в разрешении неопределенности 1-го типа при анализе кардиоинтервалов

В.В. Еськов, О.Б. Семерез, А.В. Блинов, К.А. Эльман

Сургутский государственный университет

Введение

В медицине при проведении лечебных мероприятий возникают две фундаментальные задачи: оценка эффективности (или неэффективности) проводимых лечебных мероприятий и оценка значимости диагностических признаков, которые обеспечивают такую оценку на основе анализа различий в выборках параметров вектора состояния биосистемы (ВСБ) $x = x(t)$.

Если мы имеем выборки $x^1(t)$ до лечения и после лечения $x^2(t)$, то идентификация значимости диагностических признаков x_i составляет основу клинической диагностики. Анализ выборок диагностических признаков обеспечивает оценку гомеостаза, идентификацию заболевания и эффективность лечебных мероприятий (т. е. переход от патологии к норме) [1–5].

1. Стохастическая и хаотическая оценка параметров порядка

В медицине набор диагностических признаков x_i образует ВСОЧ – вектор состояния организма человека (в m-мерном фазовом пространстве состояний – ФПС) в виде $x = x(t) = (x_1, x_2, \ldots, x_m)^T$. Компоненты этого ВСОЧ x_i могут иметь разную диагностическую ценность. Некоторые из них могут быть главными (параметрами порядка), другие – второстепенными. Обычно в медицине значимость этих диагностических признаков x_i выбирается путем длительного наблюдения и сравнения. Например, в рамках стохастики, когда мы сравниваем две выборки для компонент x_i всего ВСБ (получаемые на больных).

Если из статистики известно, что конкретный параметр ВСБ – x_i – изменяется существенно, то мы можем по величине этого изменения судить о начале патологии или об эффективности лечебных мероприятий. При сильном изменении средних значений $<x_i^1>$ до начала лечения и $<x_i^2>$ после лечения мы говорим о высокой эффективности лечения. При низкой дифференцировке (различиях) мы говорим о слабом эффекте лечебных мероприятий.

Довольно часто возникают ситуации, когда статистика говорит о полном отсутствии различий между D_x и средними (по группе больных) значениями x_i. Обычно в этом случае медики констатируют очевидный факт – медицина для этой группы (или для одного пациента) не дала ощутимого результата. В действительности ситуация может быть гораздо сложнее: различия все-таки имеются, но в рамках стохастики они просто не регистрируются. Возникает неопределенность 1-го типа. Выход из этого положения мы предлагаем в рамках новых методов теории хаоса и самоорганизации (ТХС), на основе анализа параметров ВСБ с использованием нейрокомпьютерных технологий.

В работе изучалась группа из 30 больных с острым нарушением мозгового кровообращения – ОНМК, для которых использовались (длительно, около 1 месяца) методы кинезотерапии (КЗТ) и одновременно регистрировались 15 параметров сердечно-сосудистой системы (ССС). Эти измерения проводились четыре раза: перед сеансом КЗТ и сразу после сеанса. Такая процедура использовалась в первые дни терапии и в конце курса лечения.

Обозначение параметров КРС в работе производилось следующим образом: x_1 – SIM – показатель активности симпатического отдела вегетативной нервной системы, у.е.; x_2 – PAR – показатель активности парасимпатического отдела, у.е.; x_3 – HR – стандартное отклонение измеряемых кардиоинтервалов, мс; x_4 – INB – индекс напряжения (по Р.М. Баевскому); x_5 – SSS – число ударов сердца в минуту; x_6 – SpO_2 – уровень оксигенации крови (уровень оксигемоглобина); x_7 – TINN – триангулярная интерполяция гистограммы NN-интервалов, мс; x_8 – pNN50 – число NN-интервалов, отличающихся от соседних более чем на 50 мс; x_9 –VLF – спектральная мощность очень низких частот, мс^2; x_{10} – LF – спектральная мощность низких частот, мс; x_{11} – *HF* – спектральная мощность высоких частот, мс^2; x_{12} – Total – общая спектральная мощность, мс^2; x_{13} –LFnorm – низкочастотный компонент спектра в нормализованных единицах; x_{14} – HFnorm – высокочастотный компонент спектра в нормализованных единицах; x_{15} – LF/HF – отношение низкочастотной составляющей к высокочастотной. Из этих 15 параметров были выбраны пять новых индексацией (x_1 – SIM, x_2 – PAR, x_3 – INB, x_4 – SpO_2, x_5 – SDNN).

Выборки сравнивались в рамках стохастики, т. е. мы пытались выявить, как разовый сеанс кинезотерапии влияет на организм человека. Использовался критерий Вилкоксона (достоверность различий принимали при уровне значимости $p < 0{,}05$). Отметим, что неопределенность 1-го типа в медицине не является экзотикой. Это довольно часто возникающая ситуация, когда стохастика не может подтвердить достоверных различий между выборками. Такую ситуацию мы наблюдали в геронтологии [1–3] и экологии человека [3, 4], при изучении влияния физических нагрузок на параметры сердечно-сосудистой систе-

мы человека [2], в условиях изменения экологических факторов среды [4, 5].

2. Результаты клинических исследований

В нашем случае наблюдались неопределенности 1-го типа при воздействии кинезотерапии на организм больных с ОНМК. Результаты статистической обработки данных представлены в табл. 1.

Таблица 1

Статистическая проверка различий между параметрами выборок x_i показателей вариабельности сердечного ритма у пациентов до разовой процедуры кинезотерапии и после кинезотерапии на начальном этапе всего курса лечения

		Параметры ВСР				
		1	2	3	4	5
		SIM	PAR	INB	SpO_2	SDNN
Медиана	До	14,70	3,57	172,74	97,97	20,42
	После	15,52	2,41	169,54	97,45	21,97
Оценка $p < 0,05$		0,045	0,05	0,060	0,480	0,845

Примечание: SIM, у.е. – индекс активности симпатического звена ВНС; PAR, у.е. – индекс активности парасимпатического звена ВНС; INB, у.е. – индекс напряжения регуляторных систем по Р.М. Баевскому; SpO_2, % – уровень насыщения гемоглобина крови кислородом; SDNN – стандартное отклонение измеряемых кардиоинтервалов, мс; p – уровень значимости, используемый при оценке рассчитанного критерия Вилкоксона. При расчете критерия Вилкоксона уровень значимости, достаточный для отклонения нулевой гипотезы, принимали $p < 0,05$. Число обследуемых $N = 30$.

Следуя выводам из таблицы 1, можно сделать заключение, что разовая процедура кинезотерапии не оказывает существенного влияния на параметры ССС у больных с ОНМК, так как только SIM и PAR приблизилось по p к 0,05, а остальные x_i имеют $p > 0,05$. Тогда возникает вопрос о механизмах лечебного действия кинезотерапии у больных с ОНМК. В чем заключается действие КЗТ на параметры ССС и как проявляется лечебный эффект? С позиций стохастики ответить на этот вопрос затруднительно, так как выборки существенно не различаются! В восстановительной медицине у нас сейчас уже имеется более сотни подобных примеров (сравниваемых пар выборок), когда якобы организм находится в стационарном состоянии, а реально он выздоравливает [1–5].

Для разрешения неопределенности 1-го типа мы использовали нейро-ЭВМ (НЭВМ) в режиме бинарной классификации. В этом случае использовалось пятимерное ($m = 5$) фазовое пространство состояний, для которого составлялись наборы (выборки) признаков x_i до начала КЗТ и сразу после окончания процедуры КЗТ. В режиме задачи бинарной классификации эти состояния ССС разделились, т.е. нейроэмулятор показал различия между наборами выборок. Однако при повторах решения этой задачи веса W_i диагностических признаков x_i получались каждый раз различные.

Иными словами, НЭВМ разделяет выборки, показывает, что состояния организма перед процедурой и после нее различаются, но значимость признаков x_i для каждой настройки НЭВМ меняется. Фактически не представляется возможным определить параметры порядка, т.е. наиболее важные x_i, что для медицины очень важно. Ранжирование диагностических признаков x_i имеет большое значение как в диагностике, так и в оценке эффективности лечебной процедуры, о чем было сказано выше (две фундаментальные задачи медицины: диагностика нормы и патологи и выбор наиболее значимых признаков x_i) [1–5].

Сейчас речь идет не только о разделении выборок, которые в стохастике не различаются, но и о необходимости ранжирования значимости диагностических признаков путем решения задачи на НЭВМ. Невозможно точно обозначить, какие x_i наиболее значимые, а какие – нет, так как веса этих x_i в виде W_i будут хаотически изменяться. Колебание значений W_i для 50 итераций (повторов решения задачи бинарной классификации) при одинаковом представлении двух выборок x_i (до начала сеанса КТЗ и после такового) продемонстрированы на рис. 1. Здесь все признаки (начиная с x_1 – SIM и заканчивая x_5 – SDNN) демонстрируют при каждой итерации (величина W_{ij}, где $j = 1, 2, \ldots, 50$ – это номер итерации – решения задачи бинарной классификации) свои значения весов признаков (высоты столбиков – W_{ij}).

Из рис. 1 следует, что все W_{ij} для каждого $i = 1, 2, \ldots, 5$ показывают хаотические величины из интервала (0, 1). Более того, в табл. 2, которая представляет результаты усреднений x_i по 1000 итераций (из 5 серий) НЭВМ и вариационные размахи этих средних значений весов признаков $<W_i>$, мы можем увидеть результаты усреднения по j при $\max j = k = 1000$.

Из табл. 2 следует, что на первом месте по значимости находится признак x_4 – SPO_2, его среднее значение по 1000 итераций ($k = 1000$) равно $<W_{4j}> = 0,75$, а на втором месте $<W_{5j}> = 0,58$, значимость признака x_1 – SIM (в отличие от табл. 1, где x_1 – SIM имел уровень значимости $p = 0,045$ (критерий Вилкоксона), т.е. состояние SIM до сеанса кинезотерапии и после разовой процедуры существенно различаются) находится на 4-м месте (малозначимый признак). Таким образом, статистика очень отличается от данных весов x_i для НЭВМ.

Таким образом, результаты сравнений табл. 1 и 2 (для НЭВМ) существенно различаются. В стохастике x_1 – SIM – единственный значимый признак (различается до начала КЗТ и после). Наоборот, в режиме итераций НЭВМ на 1-м месте x_2 – PAR, потом x_3 и, наконец, x_5 – SDNN, который в стохастике вообще был совершенно незначим (по Вилкоксону $p = 0,845$ – почти точное совпадение, а в НЭВМ его $<W_{ij}> = 0,68$). Имеем разные параметры порядка, и НЭВМ различает выборки, а стохастика – нет.

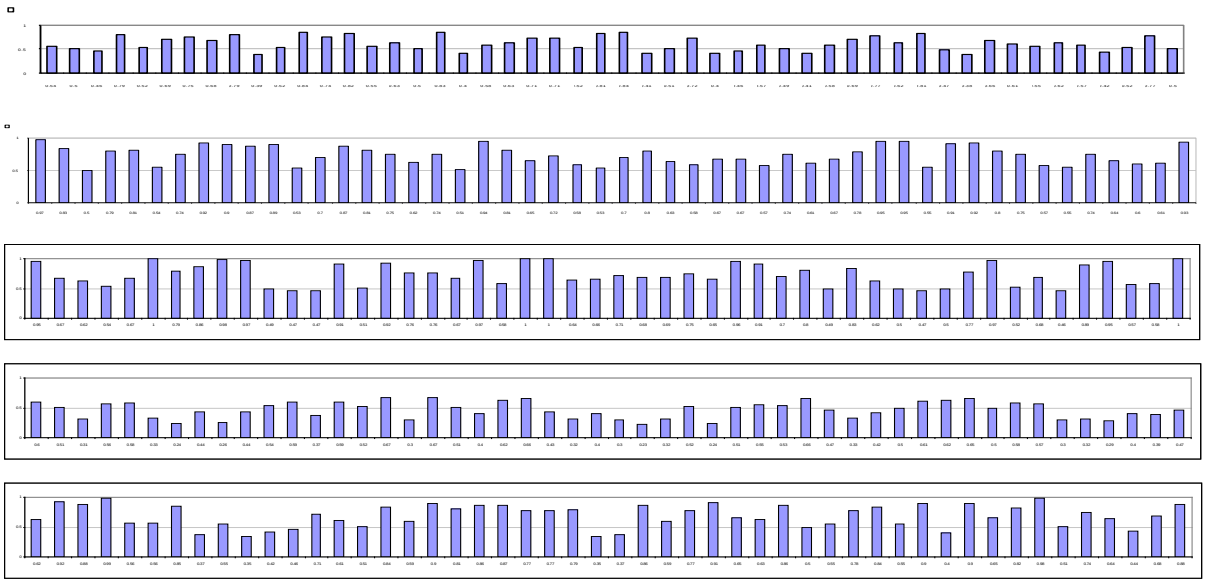


Рис. 1. Гистограммы расчёта весов признаков W_i (i = 1, 2, …, m) для m = 5 (x_1 – SIM, x_2 – PAR, x_3 – INB , x_4 – SPO_2, x_5 – SDNN) параметров вектора состояния сердечно-сосудистой системы пациентов с острым нарушением мозгового кровообращения на раннем периоде целого месяца лечения до и после разового сеанса кинезотерапии

Таблица 2

Усредненные значения отдельных координат x_i весов признаков W_i вектора состояния системы для разных серий итераций ($k \geq 1000$) при идентификации параметров порядка нейроэмулятором после $k \geq 50$ итераций (настроек ЭВМ) в режиме бинарной классификации при анализе результатов кинезотерапии (до сеанса и после сеанса) в начале всего курса кинезотерапии

Расчеты итераций по выборкам ($N \geq 1000$)	Средние значения весов признаков $<W_i>$ для координат вектора состояния системы x_i				
	SIM	PAR	INB	SPO_2	SDNN
k = 1000j = (1, …, 1000)	0,62	0,76	0,73	0,45	0,67
k = 1000j = (1000, …, 2000)	0,62	0,75	0,73	0,45	068
k = 1000j = (2000, …, 3000)	0,63	0,75	0,74	0,45	0,67
k = 1000j = (3000, …, 4000)	0,62	0,75	0,73	0,45	0,69
k = 1000j = (4000, …, 5000)	0,62	0,76	0,73	0,45	0,68
Вариационный размах средних значений $\Delta<W_i>$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
k = 5000j = (1, …, 5000) Среднее $<W_i>$	0,62	0,75	0,73	0,45	0,68

Примечание: Число итераций нейросети $k \leq 5000 = 5 \cdot 1000$ (всего k = 5000).

Получилась полностью инвертированная картина в режиме НЭВМ: что было в стохастике значимым признаком (x_1), стало незначительно, худший признак x_5 занял 3-е место по значению при сравнении выборок x_i в пятимерном ФПС до начала сеанса КЗТ и сразу после него в самом начале курса лечения. Отметим, что подобные итерации происходят в реверберации, и, заставляя НЭВМ реверберировать, мы фактически моделируем работу нейросетей мозга, в частности нейросети гипокампа.

Для исследуемых выборок 5 наиболее значимых диагностических признаков x_i мы получили неопределенность 1-го типа. С использованием НЭВМ и возникает вопрос о возможностях ТХС. Итог всех этих результатов – необходимость применения для разрешения неопределенности 1-го типа методов теории хаоса и самоорганизации.

3. Сравнение результатов НЭВМ и ТХС

При применении методов ТХС на первом шаге мы должны произвести расчет параметров квазиаттракторов (КА). Сразу отметим, что главный результат – это резкое уменьшение объема КА после лечения. Так, например, до начала ФВ объем квазиаттракторов V^1_x = 50,26·10^6 у.е., а после лечебного воздействия V^2_x= 8,71·10^6 у.е., т.е. объем КА резко уменьшился – почти в 6 раз. Произошла стабилизация сразу всех 5 параметров ВСОЧ. Уменьшение объема КА составило W = 50,26/8,71 = = 5,8 у.е. Эта величина, деленная на время процедуры (30 мин.) показывает относительную скорость изменения объема КА в час, т.е. $v = W$/0,5 ч = = 11,6 у.е./ч.

Однако положение центров КА по каждой координате x_i существенно не изменилось. Мы не можем говорить о заметном движении центра КА

в ФПС, так как мерой движения является $z \geq 2$. Таким образом, мы можем говорить о скорости изменения объема $\langle V \rangle = \sum z_i/(\Delta tm)$, где $m = 5$.

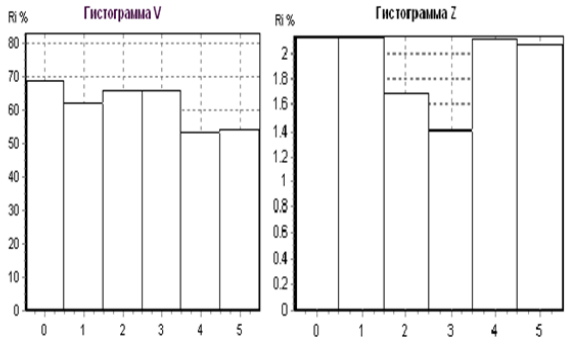


Рис. 2. Гистограммы изменений относительных величин объемов *V* и расстояния *Z* в фазовом пространстве состояний при последовательном исключении x_i (i = 1; 0,05)

На рис. 2 представлены результаты расчетов относительных изменений $W = V^1_x / V^2_x$ объемов V_x квазиаттракторов при последовательном исключении (поочередно) отдельных параметров x_i вектора состояние ССС у пациентов с ГБ, находящихся в условиях физиотерапевтического лечения (гистограмма *V*). Одновременно мы представляем и величины изменения межаттракторных расстояний *Z* (до и после лечения) при последовательном исключении Z_i. Очевидно, что для этих двух гистограмм признак x_3 (под номером 3) на рис. 2 демонстрирует наиболее значимое изменение и по *W*, и по *Z*, особенно по *Z*. По *W* мы вообще имеем изменение почти в 6 раз. На втором месте по значимости следует x_2.

Таким образом, параметр x_3 и x_2 можно обозначить как два параметра порядка по критериям изменения объема *W* и расстояний *Z*. В статистике мы не можем их выделить, так как на первом месте стоял признак x_4, для которого критерий p = 0,11 (хотя он и не ниже p = 0,05), эти таблицы для ГБ не представлены, так как она показала гораздо худшие результаты, чем для КЗТ при ОНМК.

Фактически, мы из наших расчетов получали количественное подтверждение процесса выздоровления, перехода от преобладания значимости PAR к значимости SIM, перехода к нормотонии! Статистика вообще ничего этого не подтверждает, там все одинаково, и как будто нет никакого лечения и выздоровления. Невозможно в стохастике оценивать качество (и тем более количественно) эффектов лечебного процесса. Неопределенность 1-го типа в стохастике не может быть разрешена и для ОНМК и для ГБ при физиотерапии.

Очень часто в восстановительной медицине конечные эффекты настолько тонкие и слабо выраженные, что сейчас мы уверенно можем говорить об острой необходимости в разработке новых методов диагностики (особенно при идентификации значимости диагностических признаков x_i) и оценке эффективности лечения. Стохастика в этих двух фундаментальных проблемах медицины, как мы сейчас показали, можем быть совершенно не эффективна [1–3, 5], а нейроэмулятор в режиме итераций и методы ТХС (расчет квазиаттракторов) показывает параметры порядка и скорость выздоровления при лечении.

Литература

1. *Гавриленко Т.В., Еськов В.М., Хадарцев А.А.* Новые методы для геронтологии в прогнозах долгожительства коренного населения Югры // Успехи геронтологии. 2014. Т. 27, № 1. С. 30–36.
2. Способ корректировки лечебного или физкультурно-спортивного воздействия на организм человека в фазовом пространстве состояний с помощью матриц расстояний : пат. RUS 2432895 от 09.03.2010 г. / Еськов В.М., Еськов В.В., Козлова В.В., Филатов М.А.
3. Способ корректировки лечебного или лечебно-оздоровительного воздействия на пациента : пат. RUS 2433788 от 01.02.2010 г. / Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е.
4. *Филатова О.Е., Проворова О.В., Волохова М.А.* Оценка вегетативного статуса работников нефтегазодобывающей промышленности с позиции теории хаоса и самоорганизации // Экология человека. 2014. № 6. С. 16–19.
5. *Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Zimin M.I.* Uncertainty in the Quantum Mechanics and Biophysics of Complex Systems // Moscow University Physics Bulletin. 2014. Vol. 69, № 5. P. 406–411.

Параметры квазиаттракторов при анализе нелинейных процессов в генерации биопотенциалов

В.В. Еськов, Т.В. Гавриленко, Ю.В. Вохмина, М.И. Зимин

Сургутский государственный университет

Введение

Параметры электромиограмм (ЭМГ) показывают особый тип хаоса процессов, который отличен от детерминированного хаоса Лоренца – Арнольда. Автокорреляционные функции $A(t)$ не сходятся к нулю, отсутствует свойство перемешивания, константы Ляпунова меняют знак, амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) непрерывно изменяются. Для анализа хаоса параметров электромиограмм предлагается метод расчета матриц парных сравнений выборок биопотенциалов и метод расчета параметров квазиаттракторов в фазовых пространствах состояний. Представлены экспериментальные примеры таких подходов, которые демонстрируют возможности практического использования новых методов. Демонстрируется низкая эффективность метода расчета статистических и термодинамических энтропий для кардиоинтервалов и электромиограмм, что повышает значимость новых подходов в описании нелинейной динамики ЭМГ.

1. Проблема и методы

Регистрируемые в виде электромиограмм (ЭМГ) биопотенциалы мышц в различных состояниях организма испытуемых очень сложно поддаются изучению и моделированию, как и все параметры сложных биологических систем. Поэтому внедрение традиционных физических моделей в подобные биологические исследования возможно только на основе принципа неопределенности Гейзенберга и новых методов теории хаоса и самоорганизации (ТХС) [1–3]. Однако до настоящего времени нет сравнения их эффективности [1] (т.е. стохастики и метода многомерных фазовых пространств, который сейчас активно используется в различных исследованиях). В нашей работе мы делаем попытку такого сравнения на основе анализа методом многомерных фазовых пространств (ММФП) для изучения особенностей реакции нервно-мышечной системы в ответ на дозированные статические нагрузки. При этом мы отходим от традиционного понимания стационарных режимов биосистем в виде $dx/dt = 0$, где $x = x(t) = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^T$ является вектором состояния системы (ВСС). Используется расчет параметров квазиаттракторов (КА), внутри которых наблюдается движение ВСС в фазовом пространстве состояний (ФПС).

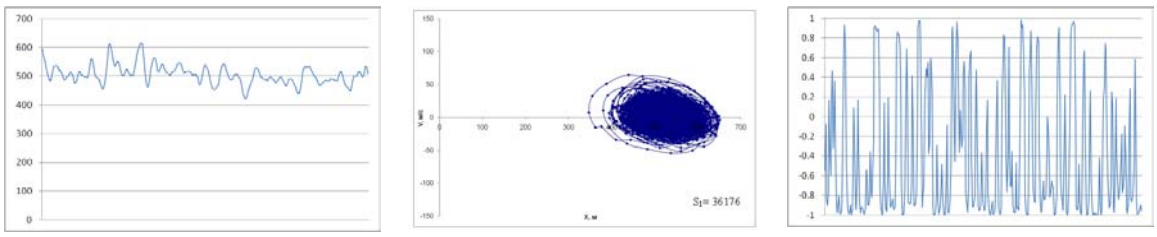
Эти движения ВСС имеют хаотический характер, т.е. постоянно $dx/dt \neq 0$, но при этом движение ВСС ограничено в ФПС объемом такого квазиаттрактора [2]. Обычно мы используем координаты $x_1 = x_1(t)$ – реальной переменной (у нас это ЭМГ), и $x_2 = dx_1/dt$ – скорость изменения фазовой координаты x_1. Иногда используется и трехмерное ФПС, где $x_3 = dx_2/dt$ – ускорение для x_1. В таких двух- и трехмерных ФПС возможно построение КА.

Ученые университета в Стенфорде при изучении произвольных движений не представили меру для измерений электрофизиологических процессов, а мы сейчас даем модели миограмм в ФПС в виде квазиаттракторов. Более того, демонстрируются различия в состоянии мышцы (при разных напряжениях) именно с позиций ТХС (в рамках стохастики это затруднительно).

В работе изучались параметры КА миограмм женщин, которые находятся в разных физиологических состояниях организма. Отметим, что в рамках стохастики таких различий нет. Для исследования по параметрам ЭМГ была привлечена группа испытуемых из 15 девушек в возрасте от 20 до 25 лет. У испытуемых регистрировались миограммы с частотой дискретизации $\tau = 0{,}25$ мс. Записи миограмм мышцы (разгибателя мизинца) обрабатывались программным комплексом для формирования вектора $x = (x_1, x_2)^T$, где $x_1 = x(t)$ – динамика абсолютного значения биопотенциалов мышцы на некотором интервале времени Δt, а x_2 – скорость изменения x_1, т. е. $x_2 = dx_1/dt$. На основе полученного вектора $x(t) = (x_1, x_2)^T$ строились КА динамики поведения ВСС и определялись объемы полученных квазиаттракторов V_G по формуле $V_G^{\max} \geq \Delta x_1 \Delta x_2 \geq V_G^{\min}$, где Δx_1 – вариационный размах величины биопотенциала, а Δx_2 – размах для его скорости изменения Δx_3 – для ускорения).

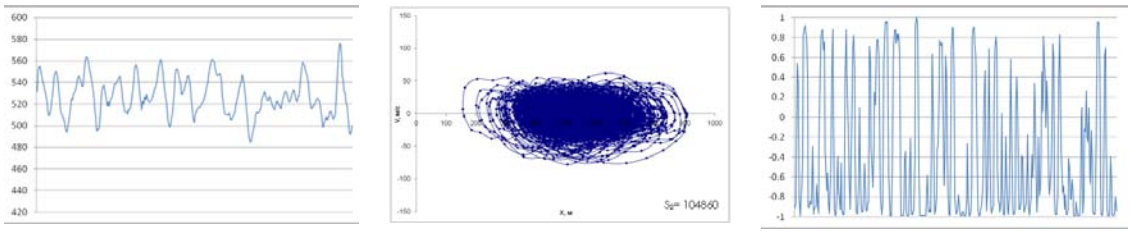
В конечном счете анализ состояния мышц испытуемых при развитии различных усилий F ($F_2 = 2F_1$) проводился на основе сравнения площади КА в виде S или объема КА V_G. Отметим, что энтропийный подход тоже широко используется в медицине, но на основе анализа значений энтропии Шеннона E. В наших исследованиях миограммы фиксировали при слабом статическом напряжении мышцы $F_1 = 5$ даН и при сильном напряжении $F_2 = 10$ даН с помощью квантования сигнала в виде файла значений x_1.

С помощью ЭВМ производилась визуализация данных, полученных с миографа, строилась временная развертка сигнала (рис. 1, *а* и рис. 2, *а*), которая преобразовывалась дискретизацией сигнала в некоторые числовые ряды (выборки V_G ЭМГ). Анализом полученных временных рядов по данным с миографии было доказано, что получаемый



а *б* *в*

Рис. 1. Результат обработки данных, полученных при слабом напряжении мышцы (F_1 = 5 даН); испытуемый МНЕ как типичный пример всей группы: *а* – временная развертка сигнала; *б* – фазовые траектории КА с площадью $S_1 = 3{,}6 \cdot 10^4$ у.е.; *в* – автокорреляционная функция сигнала *A(t)*



а *б* *в*

Рис. 2. Результат обработки данных, которые получены при двукратном усилении напряжения мышцы (F_2 = 10 даН). Здесь испытуемый МНЕ как типичный пример всей группы: *а* – временная развертка сигнала; *б* – фазовые траектории КА с площадью $S_2 = 10{,}49 \cdot 10^4$ у.е.; *в* – автокорреляционная функция сигнала *A(t)*

сигнал всегда уникален для каждого испытуемого, но при этом сохраняется некоторая закономерность, которая связана с объемом КА или *S* в фазовом пространстве x_1 и x_2.

Каждый из векторов биосистемы, перемещаясь по осям x_1 и x_2, может образовывать фазовую плоскость, описывающую динамику поведения двумерного ВСС $x = (x_1, x_2)^T$, которая и представлена на рис. 1 и 2. Из этих рисунков видно, что миограммы имеют некоторое подобие с автокорреляционной функцией $A(t)$, а квазиаттракторы у разных людей группируются в разных областях. Внешний вид сигнала, КА и $A(t)$ для усилия F_1 представлен на рис. 1, *а*, *б*, *в* и на рис. 2, *а*, *б*, *в* – для F_2).

Аналогичный анализ всех испытуемых был проведен при сильном напряжении F_2 = 10 даН. Типичный пример для всех испытуемых представлен на рис. 2 для испытуемого МНЕ. Этот рисунок демонстрирует увеличение параметров S_2 для КА при сильной статической нагрузке (F_2 = 10 даН) испытуемых в сравнение с S_1 для КА при слабой статической нагрузке (F_1 = 5 даН).

Возникает вопрос о целесообразности использования функций распределения *f(x)* для ЭМГ. Мы наблюдаем их непрерывное изменение при сравнении выборок ЭМГ, и любая ЭМГ имеет свой особый закон распределения и свою *f(x)* для каждого интервала. Были составлены матрицы парных сравнений выборок ЭМГ для всех 15 испытуемых при 2 силах сжатия динамометра ($F_2 = 2F_1$), и получены определенные закономерности изменения числа «совпадений» пар выборок *k*, параметров ЭМГ. Оказалось, что в первом случае (для F_1) матрица 15 × 15 (она дает 105 разных пар сравнений) при усилии F_1 = 5 даН показывает меньшее число *k* совпадений пар (т.е. $k_1 = 5$), чем при $F_2 = 2F_1$ ($k_2 = 4k_1$).

Мы предлагаем использовать подобные матрицы парных сравнений ЭМГ (и их функций распределения *f(x)*) для оценки физиологического состояния мышцы, выявления особенностей ее регуляции. Разовые же сравнения *f(x)*, которые сейчас в физиологии широко используются, не имеют никакого смысла. Появления $p < 0{,}05$ в таких матрицах совершенно хаотично, имеет значение только число «совпадений» *k*. Оно зависит от функционального состояния мышцы (величины усилия *F*, от охлаждения мышцы, введения миорелаксанта, утомления и т.д.). Величина *k* реально может быть использована в физиологических или психофизиологических исследованиях, так как является новой количественной мерой выборок ЭМГ (т.е. отнесения их к одной генеральной совокупности), которая описывает функциональное состояние мышцы (впервые мы это выполнили на дыхательных мышцах [1]).

2. Возможности энтропийного подхода в оценке электромиограмм

Одновременно мы проверили значимость и эффективность критерия термодинамического типа (энтропии Шеннона *E*) для групп из разных людей, который используется в стохастике (и термодинамике) для этих же выборок ЭМГ. Результаты расчетов по всей группе показали, что распределения E_1 (для F_1) и E_2 (для F_2) будут непараметрическими. Их средние значения почти не отличаются ($\langle E_1 \rangle$ = 3,4, $\langle E_2 \rangle$ = 3,14), а значения (что значительно больше 0,05) медиан очень слабо различаются (*Me* E_1 = 3,3, *Me* E_2 = 3,5). Это статистически недостоверные различия при критерии значимости различий для этих двух выборок в виде p = 0,94. Таким образом, термодинамический (энтропийный) подход в оценке выборок ЭМГ для

двух состояний разных испытуемых ($F_2 = 2F_1$) совершенно ничего не дает. Получается, что ЭМГ одинаковы по параметрам E в этих двух состояниях, хотя матрицы парных сравнений выборок все-таки показывают разное число совпадений ($k_1 = 5$, $k_2 = 20$). С позиций расчета энтропии с мышцей ничего не происходит, она находится якобы в стационарном состоянии. Это является яркой демонстрацией условности стационарности [1–3].

Аналогично функциям распределения *f(x)* ведут себя и амплитудно-частотные характеристики – АЧХ (см. выше), которые при повторах существенно различаются, как и *f(x)*. Более того, и автокорреляционные функции *A(t)* ничего не дают. Они, т.е. *A(t),* все разные для любого интервала времени *T,* и, главное, *A(t)* не сходятся к нулю. Последнее означает, что мы имеем дело не с детерминированным хаосом. Поскольку почти все функции *f(x)* распределения различные, то это означает отсутствие равномерного распределения (меры не инвариантны). Так как *A(t)* не стремятся к нулю с ростом t и меры не инвариантны (распределения выборок ЭМГ не являются равномерными), то мы не можем говорить о хаотической динамике x_1 и x_2 в ФПС (это не хаос Лоренца – Арнольда!). Однако такой хаос мы имеем в физике (детерминированный хаос), и для него мы рассчитываем экспоненты Ляпунова (для ЭМГ они хаотически меняют знак), проверяем свойство перемешивания и требуем $A(t) \to 0$ при увеличении времени t (для ЭМГ ничего этого нет!). Отсюда и вывод: ЭМГ демонстрируют особый хаос, отличный от физических систем (нет детерминированного хаоса) [1–3].

Во многих случаях выборки площадей КА для групп испытуемых демонстрировали в наших исследованиях нормальное распределение. Мы представляем одновременно и средние значения площадей ($<S_1> = 59640$ у.е. для F_1, $<S_2> = 201908$ у.е. для F_2) и их медианы ($Me\ S_1 = 61644 – F_1$, $Me\ S_2 = 219700 – F_2$). Очевидно, что эти величины различаются более чем в три раза и представляют состояние параметров ЭМГ в двух разных физиологических состояниях всех 15 испытуемых. Отметим, что подобное изменение мы имели и для площади АЧХ (в фазовых координатах A – ам-плитуда и v – частота колебаний ЭМГ), т.е. почти в три раза.

Расчет функций распределения для площадей S исследуемых КА показывает почти статистически значимое различие ($<S_1> = 203338$ и $<S_2> = 231831$) двух выборок ($p = 0{,}07$ при критическом $p = 0{,}05$), что на порядок отличается от энтропии E (там p=0,82). Для одного человека при 15 повторах S всегда статистически различается для F_1 и F_2.

Внешний вид фазовых траекторий и площадей квазиаттракторов для F_1 и F_2 (на примере одного опыта) мы уже представили на рис. 1, 2. Здесь фазовые координаты: x_1 – реальные значения биопотенциалов, а $x_2 = dx_1/dt = V$ – скорость изменения БПМ. Очевидно почти трехкратное увеличение площади S_2 (см. рис. 2, *б*) по отношению к S_1 (рис. 1, *б*). Расчет этих двух значений площадей КА в виде S_1 и S_2 мы производили для многих испытуемых, и везде картина одинакова: увеличение силы напряжения мышцы в 2 раза увеличивает площадь квазиаттрактора ЭМГ в 3–4 раза от исходного (при $F_1 = 5$ даН и при $F_2 = 10$ даН). Характерно, что для одного испытуемого (при 15 повторах) всегда критерии Вилкоксона $p < 0{,}05$, а для нашей группы из 15 человек $p = 0{,}05$. Более того, мы проанализировали индивидуально (для каждого человека) для всех 15 испытуемых, и везде $p < 0{,}05$. Очень большой разброс по ЭМГ для каждого человека, при их объединении в группу приводит к увеличению $p > 0{,}05$.

Выводы

Анализ различных данных по регистрации биопотенциалов позволяет нам высказать утверждение, что других способов количественного описания параметров изменения биопотенциалов мышц при увеличении силы напряжения мышцы (при $F_2 = 2F_1$) или ЭЭГ при фотостимуляции на сегодня в рамках детерминизма или стохастики нет. Сейчас можно говорить о том, что квазиаттракторы ЭМГ в ФПС являются определенными моделями состояния электрической активности мышц и мозга. В рамках стохастики (АЧХ, *A(t), f(x)* и др.) мы не можем получить модели, которые бы существенно различали эти два состояния мышцы (ЭМГ при F_1 и F_2). В рамках ТХС мы можем использовать фазовую плоскость при повторении опытов (получать выборки с повторением) и для них строить КА выборок ЭМГ и ЭЭГ.

Литература

1. Способ корректировки лечебного или физкультурно-спортивного воздействия на организм человека в фазовом пространстве состояний с помощью матриц расстояний : пат. RUS 2432895 от 09.03.2010 г. / Еськов В.М., Еськов В.В., Козлова В.В., Филатов М.А.

2. Способ корректировки лечебного или лечебно-оздоровительного воздействия на пациента : пат. RUS 2433788 от 01.02.2010 г. / Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е.

3. *Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Зимин М.И.* Неопределенность в квантовой механике и биофизике сложных систем // Вестник Мос. ун-та. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2014. № 5. С. 41–46.

Влияние вариаций параметров нейросети на стохастическую устойчивость тремора

В.М. Еськов, Д.Д. Даянова, Ю.В. Вохмина, А.А. Пахомов

Сургутский государственный университет

Введение

На сегодняшний день остаётся весьма мало исследованной и весьма дискуссионной проблема моделирования произвольных и непроизвольных движений человека и животных. Работы ряда авторов в рамках компартментного подхода и стохастического описания двигательных функций человека позволяют объяснить флуктуационные характеристики движений под действием статических и динамических нагрузок [3–7]. Однако квазипериодический режим, наблюдаемый при регистрации непроизвольных движений, объяснить в рамках таких подходов затруднительно. В связи с этим возникает потребность в моделировании произвольных и непроизвольных движений, выполняемых человеком в различных условиях, а также в организации двигательных функций в аспекте стохастических и хаотических подходов [1–4].

1. Описание модели нейросети

Для решения задачи моделирования непроизвольных движений человека (тремора) была использована трёхкомпартментная двухкластерная математическая модель описания сложной биосистемы, разработанная В.М. Еськовым (рис. 1).

Имитационное моделирование на базе двухкластерной трёхкомпартментной системы управления нервно-мышечной системой (НМС) в рамках теории графов осуществлялось в среде моделирования Simulink MatLab. Аналитический вид имитационной модели динамики нервно-мышечной системы при постуральном треморе представлен системой дифференциальных уравнений (1).

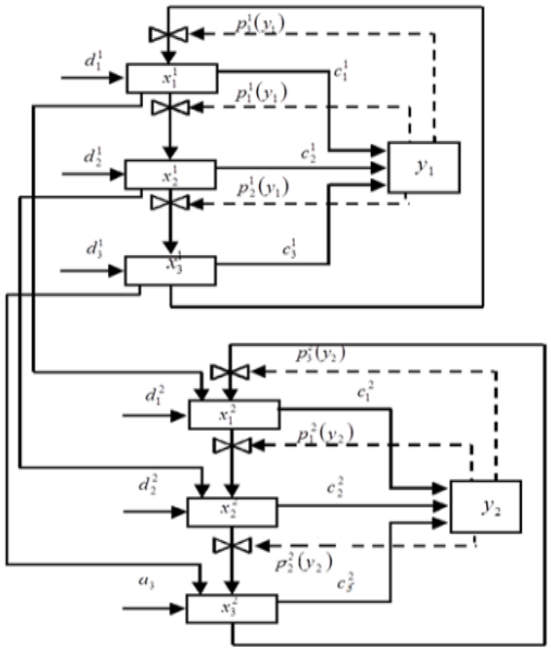


Рис. 1. Графовое представление двухкластерной трехкомпартментной модели, описывающей иерархическую организацию и принципы управления непроизвольными микроперемещениями конечности человека

Для исследования сигнала применялись методы теории хаоса и самоорганизации (ТХС), которые базировались на одновременном использовании и стохастических методов и методов ТХС (в частности, производился расчёт квазиаттракторов).

Как видно из графа иерархической модели (рис. 1), каждый кластер представляет собой циклическую трёхкомпартментную систему со своим интегративным показателем. Очевидно, что на нижний (второй) кластер оказывает управляющее воздействие на первый кластер нейросетей мозга в виде управляющих драйвов *Ud*, регулирующих амплитуду и частоту колебаний подчинённого кластера.

Управляющим драйвом для всей НМС является активирующее влияние ретикулярной формации продолговатого мозга, а в более широком смысле и нисходящее влияние стриапаллидарного комплекса. В глобальном смысле эта структура обеспечивает общее состояние организма, когда он переходит от двигательной (мышечной) активности в состояние покоя (бодрствование – сон) и наоборот.

Система уравнений, описывающая данную модель, имеет вид

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

где A_{11} – матрица внутрикластерных связей для 1-го кластера, A_{22} – для второго кластера и A_{21} – матрица связей (влияния) 1-го кластера на 2-й кластер, y – функция выхода. Значения *Ud* представляет драйвы на I и II компартменты.

На исследуемой модели вида (1) с позиций компартментно-кластерной теории биосистем (ККТБ) мы будем иметь в норме и при патологии неповторимую и непредсказуемую (с позиций ДСП) динамику тремора, если реально учитывать все семь базовых свойств биосистем в рамках ККТБ [6]. Это означает, что для любого участка треморограммы мы никогда не получим одинаковую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и другие ДСП-характеристики (но параметры квазиаттрактора приблизительно сохраняются). На модели это представлено в виде неста-

ционарных динамик треморограмм, если мы не будем изменять параметры модели в виде систем уравнений (1). Иными словами, если параметры не изменяются, то число совпадений пар выборок модельных треморограмм будет достигать 60–70 %. Напомним, что в детерминированном хаосе таких пар будет 90–95 %.

2. Результаты моделирования

При помощи построения матрицы попарного сравнения выборок легко видеть, как меняется поведение модельной биологической системы (тремора), если менять значения коэффициента диссипации b_1 в узком (см. табл. 2) и широком (см. табл. 1) диапазоне. Матрица попарного сравнения выборок (модельных треморограмм) при разных значениях коэффициента диссипации b_1 представлена в таблице 1 для случая широких интервалов изменения только одного параметра b_1 (а если все параметры изменяются сразу в широких диапазонах?).

Из табл. 1 мы видим, что только $k = 2$ пары выборок из 45 принадлежат к одной генеральной совокупности, т.е. частота k совпадений пар крайне низкая, что соответствует большому диапазону вариаций b_1, и это означает, что регуляторная система тремора претерпевает большие изменения (большое «рысканье»). Остальные пары нельзя относить к одной генеральной совокупности (их динамика хаотична). В табл. 2 представлена матрица попарного сравнения значений коэффициента диссипации b_1 для выявления чувствительности модели (во втором разряде), т.е. при малых вариациях b_1 (при малых «рысканьях» параметров системы регуляции). Мы выдвигаем рабочую гипотезу об общих принципах регуляции любых функциональных систем организма (ФСО) человека (включая нейромоторные регуляции) при больших вариациях параметров и малых вариациях. Последние могут регулироваться общим уровнем возбуждения ЦНС.

Очевидно, что изменения во втором знаке после запятой для b_1 уже нарушают принцип отнесения пар к общей генеральной совокупности. Результаты «совпадения» пар (их отнесения к общей генеральной совокупности) очень похожи на результаты, полученной от анализа треморограмм одного человека при последовательной регистрации тремора по 5 секунд (подряд) в различных режимах работы нейромышечной системы: возбуждение ЦНС увеличивается. Можно предположить, что механизм организации тремора подобен модельному процессу: если во 2-м знаке после запятой будет «плавать» значение коэффициента диссипации b_1, то будем иметь малое число значений k, а при увеличении вариаций (в 1 знаке, и даже в первой цифре вообще) k будет резко уменьшаться и система будет приближаться к хаосу в полном смысле. С ростом диапазона вариаций b_1 (и других параметров b) мы будем глубоко ухо-

Таблица 1

Матрица попарного сравнения значений модельных треморограмм при увеличенных изменениях коэффициента диссипации b_1 для выявления чувствительности модели к вариациям ($k = 2$).

b_1	**1,01**	**1,24**	**1,47**	**1,70**	**1,93**	**2,16**	**2,40**	**2,62**	**2,86**	**3,11**
1,01		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
1,24	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
1,47	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
1,70	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00
1,93	,00	,00	,00	,00		,00	,00	**,14**	,00	,00
2,16	,00	,00	,00	,00	,00		**,06**	,00	,00	,00
2,40	,00	,00	,00	,00	,00	**,06**		,00	,00	,00
2,62	,00	,00	,00	,00	**,14**	,00	,00		,00	,00
2,86	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00
3,11	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	

Таблица 2

Матрица попарного сравнения значений модельных треморограмм при малых изменениях коэффициента диссипации b_1 для выявления чувствительности модели к вариациям (k =22)

b_1, у.е.	1,55	1,56	1,57	1,58	1,59	1,60	1,61	1,62	1,63	1,64
1,55		**,25**	**,09**	,01	,00	,00	,00	**,23**	,00	**,05**
1,56	**,25**		**,43**	**,09**	,04	,00	,00	**,97**	,00	**,17**
1,57	**,09**	**,43**		**,96**	**,12**	,01	,00	**,34**	,00	**,64**
1,58	,011	**,09**	**,96**		**,53**	,02	,00	**,11**	,00	**,90**
1,59	,001	,04	**,12**	**,53**		**,50**	**,09**	,02	,00	**,49**
1,60	,00	,00	,01	,02	**,50**		,25	,00	,03	**,07**
1,61	,00	,00	,00	,00	**,09**	**,25**		,00	**,25**	,00
1,62	**,23**	**,97**	**,34**	**,11**	,02	,00	,00		,00	**,19**
1,63	,00	,00	,00	,00	,00	,03	**,24**	,00		,00
1,64	**,05**	**,17**	**,64**	**,90**	**,49**	**,07**	,00	**,19**	,00	

дить в хаос, когда функции распределения вообще не будут совпадать и каждая выборка будет отлична от всех остальных. Такая ситуация характерна для ухода ЦНС и НМС в область полной «независимости» последующих состояний от предыдущих. В нейросетях мозга эта ситуация соответствует большей неопределенности (вариация нарастает), и тогда число повторов будет небольшим (пар совпадений $f(x)$!). Это соответствует табл. 1. Сужение интервалов вариации (табл. 2) приближает нейросеть к стохастике, k нарастает. Подобная картина получается при сравнении тремора (табл. 1) и теппинга (табл. 2), где под действием управления интервалы сужаются, а k нарастает!

Вывод

Так мы можем представлять общий механизм работы мозга для любых регуляторных систем организма (включая и ФСО). В итоге для тремора мы имеем большие вариации «произвольности» регуляции, которые проявляются в изменении диапазонов вариации параметров ЦНС (и ФСО). Всё это проявляется в итоге в увеличении величины k в матрицах парных сравнений для теппинга. Проведённые исследования по анализу и идентификации динамики поведения сложных биомеханических систем с хаотической динамикой поведения, построение их математических и имитационных моделей свидетельствуют о суперпозиции чисто хаотического движения (постурального тремора) с некоторыми произвольными (управляющими) воздействиями со стороны ЦНС, которые в основе (по своим механизмам) проявляются в ширине вариационных зон систем регуляции.

Мы не можем убрать в микродвижениях хаотическую составляющую, так как это базовое свойство любой биомеханической системы, и это свойство имеет диагностическую ценность. На протяжении долгого времени ведутся споры между учёными о характере якобы непроизвольных движений человека (тремора): хаотическая эта динамика или произвольная (периодическая). Наши исследования показывают, что в действительности тремор по своей природе носит хаотический характер, однако на фоне хаоса имеют место и общие регуляторные процессы, которые при произвольных движениях (теппинге) приближаются к периодическим колебаниям. Последние тоже непрерывно изменяют свои параметры, но число пар совпадений их выборок (k) при этом нарастает.

Таким образом, компартментно-кластерное моделирование позволяет доказать непрерывную хаотическую динамику непроизвольных движений человека в условиях нормы и патологии. В последнем случае (при болезни Паркинсона) у нас просто появляется генератор колебаний (хаотичный). Это позволяет дать количественное и качественное описание постурального и патологического (последний похож по своим характеристикам на теппинг) тремора конечности человека при оценке влияния внешнего управляющего воздействия в условиях, например, изменения коэффициента диссипации b_1 или других b_1-параметров модели. При изменении U мы можем наблюдать вообще эволюцию болезни Паркинсона, что проявляется в параметрах тремора и в итоге в величине k матрицы парных сравнений выборок тремограмм.

Литература

1. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. М. : УРСС, 2004. 128 с.

2. *Бернштейн Н.А.* Биомеханика и физиология движений / под ред. В.П. Зинченко. М. : Изд-во Ин-та практ. психологии; Воронеж : НПО «МОДЭК», 1997. 608 с.

3. *Вохмина Ю.В., Гавриленко Т.В., Зимин М.И.* Модели сложных систем с позиций физики и теории хаоса-самоорганизации // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2013. № 1. С. 51–59.

4. *Еськов В.В., Вохмина Ю.В., Гавриленко Т.В., Зимин М.И.* Модели хаоса в физике и теории хаоса-самоорганизации // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2013. № 2. С. 42–56.

5. *Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В.* Кинематика биосистем как эволюция: стационарные режимы и скорость движения сложных систем – complexity // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2015. № 2. С. 62–73.

6. *Eskov V.M., Papshev V.A., Eskov V.V., Zharkov D.A.* Measuring biomedical parameters of human extremity tremor // Measurement Techniques. 2003. V. 46, № 1. P. 93.

7. *Eskov V.M.* Evolution of the emergent properties of three types of societies: The basic law of human development // Emergence: Complexity and Self-organization. 2014. V. 16, № 2. P. 107–115.

Хаотическая динамика параметров гомеостаза – особый тип нелинейных систем

В.М. Еськов, А.А. Хадарцев, О.Е. Филатова, В.В. Еськов

Сургутский государственный университет

Введение

С момента выхода работы И. Бернара (1864) и затем У.Б. Кэннона (1932) идет дискуссия о терминологии и моделях в описании гомеостаза любого сложного биологического организма. Последние годы нами получены данные о том, что стохастика и детерминированный хаос не могут предложить адекватные модели гомеостаза из-за невозможности произвольного повторения начальных параметров всех компонент $x_i(0)$ вектора состояния организма $x(t)$ (параметров гомеостаза). В этом случае предлагается расчет параметров квазиаттракторов для оценки гомеостаза, и даются понятия неопределенности 1-го и 2-го типов в описании сложных биосистем. Разработаны три метода идентификации стационарных режимов гомеостаза. Вводятся новые определения стационарности и понятие эволюции гомеостаза в виде моделей кинематических характеристик такой эволюции. Представлены примеры из экологии человека, антропометрии и восстановительной медицины, которые иллюстрируют возможности нового подхода в физиологии медицины и экологии человека. При этом появляется новая трактовка принципов работы нейросетей мозга.

Хронология понятия гомеостаза

Впервые о возможности гомеостатического регулирования параметров организма, состояния его внутренней среды, которая отлична от внешней среды, начал говорить Клод Бернар (1813–1878). Положения своей теории он изложил в работе «Введение в экспериментальную медицину» (*Bernard C.* Introduction a la medicine Experimentale. Paris, 1952. Original – 1864). Бернар отмечал: «Постоянство или стойкость внутренней среды, гармонический набор процессов являются условием свободной жизни организма». В этой работе человечество впервые вплотную подошло к понятиям «регуляция», «живые системы с особыми свойствами». Работами А.А. Богданова, Л. фон Берталанфи были представлены основы общей теории систем (ОТС). Работы в области неравновесных систем в дальнейшем послужили основой для развития многих новых направлений ОТС, кибернетики и синергетики. Развитие ОТС привело в итоге к третьей парадигме, которая в качестве своего фундамента взяла новое понимание гомеостаза, стационарных режимов биосистем в целом [1, 2] и новое понимание эволюции гомеостатичных систем, к которым в первую очередь относится мозг человека, его функциональные системы и организм в целом.

Через 150 лет после публикации К. Бернара наука начала детализировать понятия внутренней среды и выделила различные системы регуляции, но проблема гомеостаза осталась. В первой половине XX века Уолтер Бредфорд Кеннон (1871–1945), анализируя особенности висцеральных функций живого организма (на примере пищеварения) и ряда нейрогуморальных процессов, вводит понятие саморегуляции физиологических процессов. В своей известной работе «Мудрость тела» (*Cannon W.* The Wisdom of the Body. New York, 1963. Original – 1932) он впервые вводит понятие гомеостазиса. Похоже, это понятие с позиции кибернетики изучал У.Р. Эшби (1903–1972), который начал говорить о гомеостазисе (как свойстве исходно человекомерных систем) для любых сложных систем, находящихся в динамическом равновесии (ДР). Однако само понятие равновесия (эквивалентность) для сложных биосистем остается без четкого определения [1–5], на что обращали внимание П.К. Анохин и Н.А. Берштейн. Мы подчеркиваем, что с термодинамической точки зрения ДР связано с понятием эволюции и флуктуациями, однако последние для систем третьего типа (СТТ) не существуют. СТТ находятся в особом типе хаоса, в котором нет флуктуаций и нет детерминированного хаоса.

Во второй половине XX века понятие «гомеостазис» перешло в понятие «синергетические системы», которые обладают особыми свойствам и которые весь XX век в рамках ОТС (начиная от Л. фон Берталанфи) пытались изучать и описывать. В рамках такой хронологии следует сказать и о теории функциональных систем организма (ФСО) человека, созданной П.К. Анохиным и разрабатываемой его научной школой. Однако эта область знаний о предтечах синергетики – особая область, требующая отдельного большого разговора, так как сама синергетика неизбежно должна подойти к созданию третьей парадигмы и отойти в своем описании сложных биосистем (complexity – СТТ) от детерминизма и стохастики [3–10].

Стационарные режимы и эволюция СТТ

Для сложных, хаотических и самоорганизующихся систем их гомеостаз в рамках третьей парадигмы характеризуется основными свойствами: кластеризация и компартментализация внутренних структур, мерцание ВСС в фазовом пространстве состояний (ФПС) в пределах некоторого квазиаттрактора (КА), эволюция этих КА в ФПС и, наконец, возможность хаотически изменять параметры КА в виде их объемов в совершенно разных

пределах, выходящих за три сигмы, 10 сигм и более. Все это относится к пяти особым свойствам сложных (синергетических) систем, к которым в первую очередь относится организм человека в целом и его мозг, ФСО (которые мы рассматриваем как кластеры). Таким образом, современная трактовка гомеостаза в рамках третьей (синергетической) парадигмы дает нам новое понимание этого термина (особого состояния complexity), которое в рамках ДСП раньше описывалось условиями для ВСС в виде $dx / dt = 0$ при $x_i = \text{const}$ или функциями распределения $f(x)$. Теперь мы можем говорить о некоторых постоянных (условно) параметрах квазиаттракторов. Последнее касается как объемов V_G КА, так и координат их центров в ФПС. Гомеостаз теперь может быть представлен условиями: $V_G \approx \text{const}$, $x_i^c \approx \text{const}$ (где x_i^c – координаты центров квазиаттракторов). Однако при эволюции и центр квазиаттрактора, и его величина (V_G) должны изменяться (эволюционировать). В этом случае мы будем говорить об эволюции самого гомеостаза [3–7].

Дальнейшее развитие понятия гомеостаза будет определяться динамикой развития теории хаоса и самоорганизации (ТХС) и синергетики, что связано с фундаментальной перестройкой подходов, определений, понятий (при изучении сложных биомедицинских систем). В особых системах третьего типа (СТТ), которые сейчас представляют как complexity, мы должны непрерывно мониторировать параметры ВСС x(t) и изучать динамику КА [1–8,10].

Для материальной точки или физического тела как совокупности материальных точек мы всегда должны задавать начальные параметры движения, т.е. должно быть определенное значение $x(t_0)$ – координаты материальной точки в фазовом пространстве состояний в начальный момент времени $t = t_0$, и необходимо знать траекторию движения материальной точки в ФПС. Все это для СТТ невозможно в принципе из-за $dx/dt \neq 0$ и несохранения вида статистических функций распределения $f_j(x)$ для каждой x_i – координаты ВСС (все f_j(x) непрерывно изменяются для биосистемы, находящейся в гомеостазе, где j – номер выборки $x(t)$ на некотором интервале времени Δt_j).

Задание $x(t_0)$ и описание $x(t_k)$ в виде уравнений (кинематики или динамики) должно происходить точно (это идеальная теоретическая конструкция в рамках детерминизма) или в рамках статистических функций распределения $f(x_k)$. В случае детерминистского моделирования (точные уравнения кинематики и динамики) и в случае стохастического описания движения (для конечного состояния материальной точки в ФПС) нам необходимо точно задавать начальное значение вектора состояния системы $x(t_0)$. Если $x(t_0)$, как и любое промежуточное состояние вектора состояния в ФПС в виде $x_i(t_k)$, а также конечное состояние $x(t_k)$ невозможно экспериментально повторить (последнее хотя бы в рамках функции распределения $f(x)$), то мы имеем дело с уникальными объектами, про которые И.Р. Пригожин в своем предсмертном обращении к потомкам («The Die is not Cast») говорил: «Уникальные системы не являются объектом науки» [4]. Многие компоненты вектора $x(t)$ гомеостаза организма человека в ФПС демонстрируют такие свойства, что $dx / dt \neq 0$ непрерывно, а $f(x)$ тоже непрерывно изменяется (опыт невозможно повторить даже в рамках стохастики). При непрерывном и многократном повторении динамики процесса (гомеостаза) и непрерывном мониторинге вектора состояния $x(t)$ мы будем наблюдать череду изменяющихся $f(x)$ для каждой отдельной выборки, даже если эти выборки будут получаться подряд от одного и того же организма (испытуемого). Это второе, главное, свойство всех сложных систем, систем третьего типа [2−8].

Можно выдвинуть фундаментальное утверждение: жизнь (и гомеостаз как ее проявления) – это непрерывный «тремор» всех координат гомеостаза. Как тогда описывать такие движения и что такое движение СТТ в ФПС?

Уникальные результаты мы получали при анализе более 20000 электрокардиограмм (кардиоинтервалов), электромиограмм, электронейрограмм и любых других параметров гомеостаза (включая и колебания биохимических параметров крови и других биологических систем) у одного и того же человека за короткий промежуток времени (и тем более на длительных интервалах T) или для разных людей. Во всех случаях более нет строгого статистического совпадения всех параметров у разных людей при их сравнении. С позиций детерминизма или стохастики очень редко $f(x)$ может совпадать. Это все происходит случайно, без закономерностей. Мы имеем полную неопределенность будущего состояния СТТ, так как прогнозировать $f(x)$ невозможно. Получив выборку $x(t)$ на интервале Δt_1, мы не можем гарантировать повторения этой же $f_1(x)$ на следующем Δt_2, т.е. $f_1(x) \neq f_2(x)$.

Второй принцип ТХС в организации биосистем (свойство мерцания – glimmering (или flickering) property) выводит их из пространства традиционной науки и делает СТТ похожими на квантовые частицы, для которых вместо равенств мы можем писать только неравенства. При этом все-таки имеются и определенные закономерности у СТТ, которые обусловлены свойствами самоорганизации любой СТТ. Хаос и самоорганизация (попытки организации порядка) – это две стороны существования гомеостатической системы. Можно говорить (как И.Р. Пригожин) о порядке из хаоса, но что тогда понимать под порядком и является ли гомеостаз порядком? Жизнь – непрерывный «тремор» вектора состояния в ФПС, т.е. борьба хаоса и самоорганизации, которая существенно отличается от термодинамического равновесия. Это не броуновское движение, здесь нет флуктуаций вокруг средних значений, возможны выходы за 3, 10 и даже 20 сигм, это хаос и самоорганизация. Именно это и имели в виду Н. Бернштейн и П. Анохин [1, 2], а у нас это проявляется в калейдоскопе функций распределения $f(x)$. Самоорганизация на каком-то Δt_i дает какую-то $f_i(x)$,

но на следующем Δt_j, где $j = i + 1$, уже будет другая $f_j(x) \neq f_i(x)$ и т.д. Мы наблюдаем калейдоскоп $f_i(x)$ [3,10].

С позиции эволюции СТТ стационарный режим теперь будет характеризоваться такими параметрами системы, когда нет существенных изменений в параметрах КА. При этом мы точно регистрируем микрохаос (неопределенность внутри квазиаттрактора), так как вектор состояния демонстрирует непрерывное движение в виде $dx / dt \neq 0$, и все $f(x)$ будут непрерывно изменяться (но нет существенных движений центров КА!). Довольно часто стохастика не дает возможность регистрировать движение вектора состояния, а в рамках ТХС мы можем наблюдать существенное движение КА (не мерцание). Для биосистем можно в некоторых случаях одновременно считать и статистику, но всегда имеется возможность зарегистрировать параметры квазиаттракторов. Сейчас мы говорим о кооперации стохастики и ТХС, что противоречит закону развития парадигм Т. Куна (новая парадигма отрицает старую).

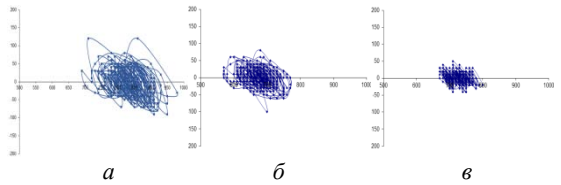
Движения квазиаттракторов в ФПС с позиции ТХС может оцениваться или по величине изменения объемов квазиаттракторов V_G, или по скорости движения центра КА $<V>$ за некоторый интервал $T = \sum \Delta t_i$, где Δt_i – наблюдаемые интервалы движения СТТ, т.е. z, а T будет некоторая эпоха наблюдения. Не исключена ситуация, что после некоторого движения КА в ФПС он может возвратиться в пределы исходного радиуса r_i^1. Тогда внутри такой окружности происходит хаотичное движение $x(t)$, т. е. $dx / dt \neq 0$ (случай циклического движения в ФПС), и целесообразно разбивать T на отрезки. Очень часто это бывает при заболевании и последующем выздоровлении человека. Однако эволюция подразумевает прямолинейное движение СТТ в ФПС, например при старении. Обычно T соизмеримо со временем старения организма, когда уже происходят необратимые изменения в параметрах вектора состояния и возврат в исходный квазиаттрактор невозможен. Приведем конкретные примеры к сказанному для поступательного движения, тогда как для вращательного движения КА мы имеем огромное число примеров из медицины и экологии, когда после переездов, например, параметры вектора состояния возвращаются в исходный КА через сумму Δt_i и реагировать на такое движение приходиться отрицательной скоростью [1–6].

В качестве примера мы рассмотрим три характерные возрастные группы женщин народности ханты, проживающих в Югре. В целом, примеры движения квазиаттракторов могут демонстрировать обратимую и необратимую эволюцию СТТ на основе расчета параметров квазиаттракторов. Поступательное движение КА в ФПС убедительно демонстрирует отсутствие стационарных режимов у изучаемых биосистем. Наличие ненулевой скорости КА обозначает отсутствие стационарных режимов сложных биосистем во всех смыслах, включая и СТТ. Неизменность (стационарность) СТТ подразумевает, что параметры квазиаттрактора не изменяются по всем координатам их центров, а точнее говоря, не выходят за пределы исходных радиусов r_c, т.е. вариационных размахов. Если этот выход начался, если $z > 1$ и эта динамика нарастает (нет возврата координат центра КА[2] в пределы исходного вариационного размаха Δx), то мы говорим о начале эволюционного движения гомеостаза в фазовом пространстве состояния. Эволюция организма может быть необратимой (например, старение организма, болезнь Паркинсона или Альцгеймера) или обратимой (например, при заболевании с выздоровлением, при изменении экологических условий (переезды) и возврате в исходное состояние и т.д.).

При эволюции гомеостаза КА изменяют объемы и координаты центров. Для демонстрации общности между динамикой поведения каждого параметра (например, кардиоинтервалов $x_1(t)$ в их двумерном фазовом пространстве состояний, а в общем случае с тремя координатами: $x_1(t)$, $x_2 = dx_1 / dt$ и $x_3 = dx_2 / dt$) и суперпозиций отдельных точек x_{ij} для многих испытуемых мы можем взять несколько разных параметров организма (но при разовых, одномоментных измерениях) и из них образовать m-мерное фазовое пространство. В этом ФПС можно одномоментно (разово) определить параметры образовавшегося квазиаттрактора на основе анализа координат всех N точек этой группы испытуемых, т.е. объем этого КА V_G и координаты его центра x_i^c. Эти параметры перед началом испытаний (например, в случае измерения параметров трех групп испытуемых для разных возрастов) дают нам информацию об исходном состоянии квазиаттрактора в момент времени t_0. Если эти параметры существенно не изменяются при измерении у одного человека за время Δt, то мы будем говорить о малой скорости изменения гомеостаза у всей группы. Наоборот, при $z > 1$ мы можем говорить о существенном движении КА в ФПС, что и было получено в наших исследованиях. Подчеркнем, что в наших испытаниях мы взяли 3 возрастные группы женщин ханты (младшая, средний возраст $<x_1>$ = 23 года, средняя, $<x_2>$ = 45 лет, и старшая, $<x_3>$ = 59 лет) и для этих трех подгрупп рассчитали все параметры изменений x_i статистически в рамках традиционного подхода и в рамках предлагаемого подхода, т.е. с позиции ТХС.

Движение КА в ФПС для трех возрастных групп женщин ханты можно рассматривать как поступательное. Внешний вид квазиаттракторов только для одной координаты (кардиоинтервалы x_i^k) в двумерном ФПС $(x(t) = (x_1^k, x_2^k)^T$, где $x_2 = dx_1/dt$, представлен на рис. 1. Существенно, что кардиоинтервалы x_1^k не дают поступательного движения, что мы чаще наблюдаем в медицине или при широтных перемещениях групп испытуемых. В геронотологии при возрастных изменениях обычно площади этих трех КА неуклонно уменьшаются в объеме (почти экспоненциально, $V_G \sim e^{-\lambda t}$). У нас они показывают следующие групповые значения: S_{G1} = 60900 у.е.; S_{G2} = 36000 у.е.; S_{G3} = 9000 у.е. Поступательное движение центров

квазиаттракторов демонстрирует почти экспоненциальное убывание их площадей S_{Gi} для КА (рис. 2).



а *б* *в*

Рис. 1. Внешний вид квазиаттракторов для одной координаты (кардиоинтервалы x_i^k) в двумерном ФПС ($x(t) = (x_1^k, x_2^k)^T$, где $x_2 = dx_1/dt$: *а* – для испытуемого 23 лет; *б* – для испытуемого 45 лет; *в* – для испытуемого 59 лет

На рисунке 2 представлена динамика реальных и модельных данных возрастных изменений площадей квазиаттракторов кардиоинтервалов женщин ханты, которая описывается уравнением Ферхюльста – Пирла $dx / dt = (a - bx)x$, где $a = 0{,}0000284$, $b = 0{,}0000526$.

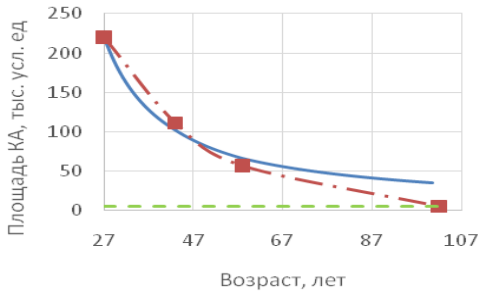


Рис. 2. Динамика реальных и модельных данных возрастных изменений площадей квазиаттракторов кардиоинтервалов женщин ханты: сплошная линия – модельные данные, штрихпунктирная – реальные данные, пунктирная – асимптота $y_a = a / b = 5{,}4$ тыс. у. е. для долгожительницы Р.Е.А. 102 года. Здесь $a = 0{,}0000284$, $b = 0{,}0000526$

В целом, кинематика ССТ сейчас нами активно используется в морфометрии, в психофизиологии при изучении изменения параметров психофизиологичных функций человека в условиях внешних воздействий. Такое движение КА всегда носит уникальный характер, т.е. КА возвращается в исходное состояние.

Литература

1. *Ведясова О.А., Еськов В.М., Филатова О.Е.* Системный компартментно-кластерный анализ механизмов устойчивости дыхательной ритмики млекопитающих : монография / Рос. акад. наук, Науч. совет по проблемам биологической физики. Самара, 2005. 198 с.

2. *Добрынина И.Ю., Еськов В.М., Живогляд Р.Н., Зуевская Т.В.* Гирудотерапевтическое управление гомеостазом человека при гинекологических патологиях в условиях Севера РФ // Вестник нов. мед. технологий. 2005. Т. 12, № 2. С. 25–27.

3. *Добрынина И.Ю., Добрынин Ю.В., Еськов В.М., Коваленко Т.Н., Пикулина С.Ю.* Оптимизация применения препаратов небилет и сиофор («Берлин-Хеми») для лечения больных с артериальной гипертонией на фоне метаболического синдрома в амбулаторно-поликлинических условиях // Сибир. мед. журн. Иркутск, 2006. Т. 64, № 6. С. 65–68.

4. *Еськов В.В., Еськов В.М., Карпин В.А., Филатов М.А.* Синергетика как третья парадигма, или Понятие парадигмы в философии и науке // Философия науки. 2011. № 4 (51). С. 126–128.

5. *Еськов В.М., Живогляд Р.Н., Папшев В.А., Попов Ю.М., Пашнин А.С.* Системный анализ и компьютерная идентификация синергизма в биологических динамических системах // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005. Т. 4, № 1. С. 108–111.

6. *Gell-Mann M.* Fundamental Sources of Unpredictability // Complexity. 1997. V. 3, № 1. P. 13–19.

7. *Eskov V.M., Filatova O.E.* Respiratory rhythm generation in rats: the importance of inhibition // Neurophysiology. 1993. V. 25, № 6. P. 420.

8. *Eskov V.M.* Models of hierarchical respiratory neuron networks // Neurocomputing. 1996. V. 11, № 2/4. P. 203–226.

9. *Eskov V.M., Filatova O.E.* Compartmental approach to modeling of neural networks: role of inhibitory and excitatory processes // Biophysics. 1999. V. 44, № 3. P. 510–512.

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

Нейронные сети и молекулярные системы, контролирующие эффективность межнейронных связей

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

Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН, Новосибирск
zapara_t@mail.ru

Память, или элемент знаний индивидуума, вероятно, определяется структурой связей (как конститутивных, так и динамических) в сетях нейронов мозга. Связи нейронов мозга, например те, которые опосредуют поведение, образуются, улучшаются и расширяются зависимыми от опыта синаптическими модуляциями [4]. Нейрон имеет множество синапсов и может быть членом многих сетей и, следовательно, многих воспоминаний, или элементов знания. Становится очевидным, что связи в сетях мозга, в том числе ассоциативные, возникают в пределах нейрона благодаря молекулярным реакциям, инициированным внешними воздействиями, приводящими к возникновению (модуляции) синаптических контактов. Как трансляция активации рецепторов нейрона, например возбуждающего медиатора глутамата, расположенных на небольших выростах дендритов (шипиках), влияет на изменение контактов с другими клетками? Известно более тысячи различных белков в шипиковых синапсах, активность и интегративные действия которых определяют равновесие между изменением эффективности и стабильностью синаптических связей [2]. Феномен длительного усиления синаптической передачи, возникающего после определенного паттерна выброса медиатора – интенсивного, непродолжительного – получил название «синаптическая долговременная потенциация» (ДВП). Наиболее широко исследуемой клеточной моделью обучения и памяти является феномен ДВП.

Нам представляется актуальным на основе технологии GeneNet (http://wwwmgs.bionet.nsc.ru/mgs/gnw/genenet/) создание базы данных и графических моделей межмолекулярных взаимодействий, происходящих в шипиках и других компартментах пирамидных нейронов гиппокампа при ДВП. Логический разбор молекулярных сетей используется для создания концептуальной модели нейрона.

Мы обобщили информацию [11] о структурно-функциональной организации: путей передачи сигнала от глутаматных рецепторов через малые ГТФазы к цитоскелету; динамики перестройки нитей актина; входа АМПА-типа глутаматных рецепторов (получивших название по их лиганду – α-амино-3-гидрокси-5-метил-4-изоксазолпропионовой кислоте), их закрепления в этой зоне и выхода из нее; доставки везикул с мембранными белками из сомы к плазматической мембране (http://wwwmgs.bionet.nsc.ru/mgs/gnw/genenet/viewer/Early/long-term/potentiation.html; http://wwwmgs.bionet.nsc.ru/mgs/gnw/genenet/viewer/AMPA.html). Временная динамика активности участников этих процессов обеспечивает повышение и сохранение синаптической эффективности в синапсах поля CA1 гиппокампа в ранней фазе ДВП. Регуляция числа и соотношения типов АМПА-рецепторов (АМПАР, состоящих из субъединиц 1/2 и 2/3), встроенных в активную зону мембраны дендритного шипика, на этапе поддержания нового уровня проводимости синаптической мембраны является механизмом гомеостатической пластичности в сетях мозга [13].

Сопоставление созданных нами молекулярных сетей GeneNet для нейронов гиппокампа, обеспечивающих реализации информационных процессов, и GeneGo выявляет совпадение набора белков, участвующих в перестройке цитоскелета фибробластов и дендритных шипиков нейронов. Принципиальное отличие заключается в организации сети взаимодействия рецепторов медиатора и малых ГТФаз. В дендритном шипике малые ГТФазы и их регуляторы организованы в характерную для шипиковых синапсов структуру, получившую название постсинаптическое уплотнение (ПСУ). В ПСУ ГТФазы идеально позиционированы для регуляции глутаматными рецепторами и CAMKII (Ca^{2+}/калмодулин-зависимая киназа II). Совпадение набора молекул, необходимых как для миграции фибробластов, так и для перемещения мембраны дендритного шипика, свидетельствует о консерватизме и универсальности организации таксиса (передвижения под влиянием раздражения). Очевидно, именно специфика организации системы межмолекулярных взаимодействий в ПСУ позволяет белкам в одних типах клеток опосредовать как морфогенез, миграцию клеток, так и информационные процессы в высокоспециализированных структурах нейрона — дендритных шипиках.

Индукция ДВП в одном синапсе уменьшает порог потенцирования в соседних синапсах благодаря проникновению в эти шипики активных ГТФаз (RhoA/Ras) [7]. Таким образом, перемещение RhoA/Ras в соседние шипики опосредует регуляцию порога индукции ДВП и интеграцию внешних сигналов на коротких отрезках дендрита.

Структурно-функциональная организация дендритных шипиков, вероятно, является реактивной системой, что определяет их готовность на определенный паттерн внешних воздействий активировать структуры шипика, изменяющие эффективность синаптических связей. Реактивные системы шипика, вероятно, возникают при развитии нейрона и во взрослом нейроне модифицируются в процессе предшествующих циклов активности нейрона. Система молекул морфологически выде-

ленного дендритного шипика (объем 0,01–1 мкм^3) в минутном интервале времени благодаря латеральной диффузии рецепторов, их экзо-, эндоцитозу, активности протеинкиназ, фосфатаз, малых ГТФаз, белков, контролирующих динамику актина, опосредует специфический для синапса процесс обработки информации, результатом которого является модуляция синаптических контактов и электрической активности сети нейронов мозга. Регуляция плотности и соотношения типов АМПА-рецепторов на этапе поддержания ДВП определяется механизмом гомеостатической пластичности в дендритной сети нейрона [13].

Анализ организации молекулярных сетей дендритных шипиков позволяет предположить, что сеть работает как единая система (молекулярная машина). Представление об объединении более сотни функционально специализированных молекул (у грызунов 27 белков из сети шипиков необходимы для синаптической пластичности и 18 для обучения) в систему переносит центр внимания от свойств отдельных участников сети шипика на интегративную активность молекулярного устройства с явными информационными функциями, весомыми для нейронной сети. М. Мигаид и соавторы [8] предположили, что молекулярные сети шипиков являются «устройствами» как для детектирования паттерна синаптической активности, так и для преобразования этой информации о внешней среде в структурно-функциональнную сеть внутриклеточных сигналов, которая может быть переведена в клеточную память.

Экспрессия ДВП после определенного паттерна активации синапса происходит быстро (10–20 с), не зависит от синтеза белков и мРНК, определяется состоянием локальной молекулярной сети шипика, которая была сформирована в предыдущие циклы активности шипика. В силу перечисленных и других свойств дендритного шипика изменение эффективности синаптической передачи происходит с высокой степенью вероятности. Поддержание достигнутого системой белков шипика более высокого уровня эффективности синаптической передачи зависит от транскрипции мРНК, трансляции белков [9], их созревания в вакуолярной системе [1], доставки из сомы к шипикам [12], а также деметилирования ДНК [18] и обеспечения этих процессов энергией [10, 17]. Для поддержания стабильного уровня синаптической передачи необходима согласованная работа многих систем клетки, и их энергетическое обеспечение является, вероятно, активным процессом.

В случае нарушения функционирования вакуолярной системы клетки (локализованной в соме) нарушается поддержание ДВП [1]. Дендриты и аксоны нейронов (синапсы) могут быть отдалены от сомы на значительное расстояние. Вакуолярная система клетки, компартмент, где происходят биосинтез, сортировка, посттрансляционные модификации, формирование транспортных везикул, определение их метки доставки к синапсам, обеспечивает фундаментальный клеточный процесс, необходимый для поддержания функций мозга [12].

Синтез белков зависит от mTOR (mammalian Target of Rapamycin) комплекса киназ, которые фосфорилируют и активизируют ключевые позитивные регуляторы трансляции белка, включая p70S6K-киназу, которая в дальнейшем фосфорилирует свою мишень – рибосомальный белок S6 (rpS6) [15, 16].

АМФ (аденозинмонофосфат) активируемая протеинкиназа (АМФК) функционирует как датчик энергии клетки и негативно регулирует mTOR-каскад [10]. В поле CA1 гиппокампа mTOR-тропа активизируется в течение пяти минут после индукции ДВП и необходима для экспрессии и поддержания ДВП [3, 16]. Взаимодействия АМФК и mTOR-комплекса киназ и трансляции белков указывают на связи между системами метаболизма энергии, синтеза белков и поддержания уровня синаптических связей.

Недавние исследования выявили участие эпигенетических модификаций, в том числе изменения в статусе метилирования ДНК, сопряженных с нейронной пластичностью [5]. Деметилирование ДНК происходит при участии белков семейства Tet1–3, которые окисляют 5-метилцитозин в 5-гидрокмиметилцитозин, чтобы инициировать процесс деметилирования ДНК [6]. Белки семейства Tet1–3 инициируют активное деметилирование ДНК, опосредуемое через базовый путь вырезания и репарации ДНК нейронов. Синаптическая активность регулирует экспрессию Tet3-белков нейронов, а Tet3-белки модулируют уровни встраивания GluR1 в синаптическую мембрану. Эти результаты свидетельствуют о функциональной роли активного деметилирования ДНК в качестве датчика синаптической активности, который регулирует основные свойства нейронов.

Потенциальные нарушения геномной стабильности, вызванные синаптической активностью, могут иметь значение для клеточных процессов в постмитотических нейронах, которые существуют на протяжении жизни нейрона [18].

Анализ молекулярной сети специализированных систем нейрона позволяет предположить, что функциональная роль синапса не сводится только к реактивному изменению его эффективности под действием стимуляции. Сохранение эффективности синаптической связи базируется на клеточной памяти, зависимой от энергетического и метаболического статуса нейрона. Включенность в обработки рецептивного сигнала многих систем клетки позволяет предположить, что на уровне клетки как элемента нейронной сети мозга происходит определение и фиксация функциональной значимости внешних стимулов [14].

Представленные в работе данные получены при выполнении базового проекта фундаментальных исследований РАН VI.35.1.5, интеграционного проекта Президиума СО РАН № 136, гранта РФФИ 12-01-00639.

Литература

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

2. *Collins M.O. et al.* Molecular characterization and comparison of the components and multiprotein complexes in the postsynaptic proteome // J. Neurochem. 2006. V. 97. P. 16–23.

3. *Cammalleri M. et al.* Time-restricted role for dendritic activation of the mTOR-p70S6K pathway in the induction of late-phase long-term potentiation in the CA1 // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2003. V. 100. P. 14368–14373.

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

5. *Guo J.U. et al.* Neuronal activity modifies the DNA methylation landscape in the adult brain // Nat. Neurosci. 2011. V. 14. P. 1345–1351.

6. *Ito S. et al.* Role of Tet proteins in 5mC to 5hmC conversion, ES-cell self-renewal and inner cell mass specification // Nature. 2010. V. 466. P. 1129–1133.

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

8. *Migaud M. et al.* Enhanced long-term potentiation and impaired learning in mice with mutant postsynaptic density-95 protein // Nature. 1998. V. 396. P. 433–439.

9. *Nguyen P.V., Abel T., Kandel E.R.* Requirement of a critical period of transcription for induction of a late phase of LTP // Science. 1994. V. 265. P. 1104–1107.

10. *Potter W.B. et al.* Metabolic Regulation of Neuronal Plasticity by the Energy Sensor AMPK // PLoS One. 2010. V. 5. e8996. doi: 10.1371/journal.pone.0008996.

11. *Proskura A.L., Ratushnyak A.S., Zapara T.A.* The Protein-Protein Interaction Networks of Dendritic Spines in the Early Phase of Long-Term Potentiation // Sci. Syst. Biol. 2014. V. 7. doi: org/10.4172/jcsb.1000136.

12. *Ramírez O.A., Couve A.* The endoplasmic reticulum and protein trafficking in dendrites and axons // Trends. Cell Biol. 2011. V. 21. P. 219–227.

13. *Shepherd J.D. et al.* Arc/Arg3.1 mediates homeostatic synaptic scaling of AMPA receptors // Neuron. 2006. V. 52. P. 475–484.

14. *Smith S.L. et al.* Dendritic spikes enhance stimulus selectivity in cortical neurons *in vivo* // Nature. 2013. V. 503. P. 115-120.

15. *Tang S.J. et al.* A rapamycin-sensitive signaling pathway contributes to long-term synaptic plasticity in the hippocampus // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2002. V. 99. P. 467–472.

16. *Tsokas P. et al.* Mitogen-activated protein kinase upregulates the dendritic translation machinery in long-term potentiation by controlling the mammalian target of rapamycin pathway // J. Neurosci. 2007. V. 27. P. 5885–5894.

17. *Vickers C.A., Dickson K.S., Wyllie D.J.* Induction and maintenance of late-phase long-term potentiation in isolated dendrites of rat hippocampal CA1 pyramidal neurons // J. Physiol. 2005. V. 568. P. 803–813.

18. *Yu H. et al.* Tet3 regulates synaptic transmission and homeostatic plasticity via DNA oxidation and repair // Nat. Neurosci. 2015. doi: 10.1038/nn.4008.

Сравнительный анализ высших когнитивных способностей птиц: эксперименты в лаборатории и в природе

З.А. Зорина, А.А. Смирнова, Т.А. Обозова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Изучение высших когнитивных способностей животных в настоящее время продвигается заметными темпами. Оно включает анализ зачатков мышления и как способности к экстренному решению новых задач, и как способности к обобщению и абстрагированию, поиски элементов сознания, а также сложные формы социальных отношений – social cognition.

Установлено, что зачатки мышления имеются у ряда представителей рептилий, млекопитающих и птиц, а высшие когнитивные способности есть не только у человекообразных обезьян, но и у представителей других таксономических групп (дельфины, врановые птицы и попугаи [5, 6]).

Цель доклада – рассмотреть наиболее важные примеры сравнительных исследований, выполненных с применением комплекса тестов как в нашей лаборатории, так и зарубежными коллегами.

В методологии этих исследований отчетливо просматривается ряд тенденций. Одна из них, как уже указывалось ранее, последовательное применение сравнительного подхода и расширение его рамок (см. [4–6, 34]). Сопоставления производятся как внутри классов, так и между классами, прежде всего последнее касается млекопитающих и птиц.

Не менее типичная и важная черта современных когнитивных исследований – это стремление к комплексному тестированию, так как только сумма разноплановых тестов позволяет объективно оценивать реальные способности вида и исключать влияние частных специализаций. Результаты сравнительных исследований становятся более убедительными, если они проводятся с помощью обширного набора тестов, которые как можно более полно характеризуют спектр когнитивных способностей сравниваемых видов.

В этот комплекс входят два блока тестов [6]. Первый позволяет оценивать способность животных к инсайту – экстренному решению новой задачи с помощью мысленного анализа ее условий и оперирования представлениями о ее структуре.

Сюда входят:

– задачи, для решения которых требуется применить «орудие» (предлагается называть их «орудийными» задачами). Наряду с классическими (использование палок, строительство пирамид из ящиков и скамеек, тушение огня [7, 12, 13]) в настоящее время разрабатываются новые тесты, в том числе универсальные – применимые для животных разных видов [21, 32 и мн. др.];

– протоорудийные тесты (приманка заранее соединена с орудием – нитью или веревкой, за которые можно приблизить к себе приманку [9, 20, 26, 29]);

– задачи на оперирование эмпирическими законами, связывающими предметы и явления внешнего мира (тесты Л.В. Крушинского [8]).

Второй блок тестов предназначен для оценки операции обобщения. Он позволяет выявить разные уровни обобщения (допонятийный и протопонятийный, или уровень довербальных понятий) и основанные на этой операции когнитивные функции – способность к символизации, к выявлению аналогий и др. [4, 5, 6].

Сочетание этих подходов позволило не только доказать наличие зачатков мышления у многих видов рептилий, птиц, млекопитающих, но и выявить связь между широтой спектра когнитивных способностей и уровнем организации мозга, тогда как образ жизни, пищевая специализация и т.п. может играть только второстепенную роль. Особое значение имеет тот факт, что высшие представители класса птиц достигают уровня человекообразных обезьян по способности к решению наиболее сложных тестов.

Остановимся подробнее на некоторых особенностях кратко упомянутых выше положений.

Л.В. Крушинский [5, 8] был одним из первых, кто привлек внимание к этому аспекту проблемы. В его работах в основу сравнительной характеристики ряда видов позвоночных первоначально была положена оценка их способности к решению стандартной элементарной логической задачи (ЭЛЗ) – задачи на экстраполяцию направления движения пищевого раздражителя, исчезающего из поля зрения животного. Она оказалась доступной многим из изученных видов, но выявила различия между ними в количественных показателях. Однако применение еще одной ЭЛЗ – тестирование на способность к оперированию эмпирической размерностью фигур (ОЭРФ) – выявило более существенные качественные различия между видами, сходными по способности к экстраполяции. Оказалось, что решать эту задачу могут только макаки-резусы, дельфины и врановые, а хищные млекопитающие с ней не справляются.

Эти различия находят подтверждение и в работах ряда других исследователей (см. [6]), которые также обнаружили у хищных млекопитающих неспособность употреблять орудия (известны лишь единичные эпизоды [28]), решать протоорудийные задачи (см. [1, 6]), формировать довербальные понятия [12] и, наконец, ограниченные способности к формированию установки на обучение.

Таким образом, сопоставляя результаты указанного комплекса тестов, можно сделать вывод о том, что спектр когнитивных способностей хищных млекопитающих достоверно уже и примитивнее, чем у низших обезьян и врановых птиц.

Сравнительные исследования способствуют, прежде всего, получению новых сведений о высших когнитивных способностях ранее не изученных видов, что существенно обогащает общие представления о закономерностях их развития в процессе филогенеза. Так, представление о когнитивных способностях класса птиц долгое время опиралось на данные, полученные при исследовании практически единственного вида – голубей, представителей древнего отряда с наиболее примитивно организованным мозгом. Это представление существенно изменилось с появлением данных о когнитивных способностей врановых птиц, а позднее и попугаев [11, 14, 23, 25, 34]. Эти данные опровергали представление об отставании птиц как класса от млекопитающих, однако и они основывались на сопоставлении всего двух видов и потому требовали подтверждения и дополнения.

В нашей работе проверка указанных положений проводится следующими способами. Во-первых, к настоящему времени врановым предъявлен практически весь диапазон перечисленных выше тестов, которые они решают на уровне человекообразных обезьян. Наряду с этим мы дополнили данные о когнитивных способностях другой высокоорганизованной группы птиц – попугаев, причем проводили эксперименты строго по тем же методикам, что применялись в опытах на воронах [11, 23].

Полученные данные углубляют сложившиеся представления о повышении уровня когнитивных способностей вида по мере усложнения организации мозга животных соответствующего таксона. Особый интерес представляет характеристика тех новых видов, уровень организации мозга которых близок к каким-то ранее исследованным видам, но которые отличаются от них по образу жизни, по характеру пищевого поведения и (или) по происхождению в филогенезе.

Такое сопоставление может способствовать выявлению факторов, которые определяют уровень развития высших когнитивных способностей. Так, например, нам удалось показать, что чайки, характеризующиеся столь же скромным индексом Портмана, как голуби и куры (3–4), и далекие от них по происхождению в филогенезе, также обладают ограниченным спектром когнитивных способностей [4, 5, 22]. Сходный факт обнаружен у представителей столь далеких по происхождению отрядов, как врановые и попугаи, мозг которых прогрессивно развивался в процессе эволюции и достиг высшего уровня в пределах класса птиц (полушарный индекс Портмана 15–16). Оба вида обладают широким спектром высших когнитивных способностей и демонстрируют сходные результаты при решении наиболее трудных тестов, как требующих экстренного решения в новой ситуации, так и связанных с оперированием понятиями и аналогиями [11, 23, 27].

Применение комплекса тестов позволяет также уточнить природу поведения при решении некоторых задач, разделять случаи решения в соответствии с лежащим в основе задачи принципом (инсайт) и квазирешения, верные внешне, но основанные на использовании каких-то побочных признаков. В качестве примера можно привести цикл наших работ по сравнительному исследованию способности птиц к подтягиванию недоступной приманки с помощью нити [1, 2, 9]. Разные виды тестов на подтягивание приманки за нить широко применяются в сравнительных исследованиях (см., например, [9, 20, 32]). Эти тесты, где приманка уже соединена с тем или иным орудием (нить, подложка), относят к категории протоорудийных.

Известно, что подтягивать приманку за нить могут представители многих видов млекопитающих и птиц [1, 2, 20]. Предполагалось, что зачастую такое поведение имеет чисто врожденную основу и не может расцениваться как инсайт [26, 29]. Чтобы проверить, каковы механизмы решения этих тестов у птиц разных видов, мы разработали и применили комплекс тестов, в котором комбинировали различные варианты взаимного расположения приманки (иногда двух приманок) и нескольких нитей. Оказалось, что только врановые птицы способны решать эти тесты, прослеживая и выявляя функциональную связь между приманкой и одной из нитей [11]. Один из вариантов опыта показал, что характерное для синиц и клестов успешное решение задачи обусловлено спецификой их поискового поведения – стремлением дотянуться непосредственно до приманки, не обращая внимания на нить, благодаря чему они, в конце концов, схватывали клювом ближайшую к приманке нить.

Таким образом, именно такое разностороннее тестирование позволяет выявить при решении данной задачи способность животных к инсайту, которую ставит под сомнение ряд авторов [26, 29].

Изучению собственно орудийной деятельности в последние десятилетия уделяется все больше внимания [18]. Как ни парадоксально, важным объектом исследований сделались птицы, прежде всего врановые [17, 33], а затем и попугаи [15], у которых регулярно отмечаются как спонтанные применения орудий по собственной воле, так и успешное решение орудийных задач в лаборатории. Многочисленные исследования посвящены популяции новокаледонских ворон, которые регулярно добывают пищу из-под коры старых деревьев с помощью орудий 3–4 типов [33]. В лабораторных условиях они продемонстрировали способность к инсайту при решении задач совершенно нового типа, никак не похожих на те, с которыми они сталкиваются в природе.

В лабораторных исследованиях применяется несколько задач, воспроизводящих известное описание находчивости ворона, который в засуху нашел немного воды на дне дупла и бросал туда камешки до тех пор, пока ее уровень не поднялся настолько, чтобы напиться. Способность решать

такую задачу продемонстрировали сначала грачи [16], бросавшие камни в цилиндр с водой, потом орангутаны и шимпанзе [21]. Характерно, что в поведении обезьян проявилась ранее описанная у них способность решать задачу разными способами, демонстрируя наличие общего плана решения [7, 12].

Один из популярных в настоящее время когнитивных тестов – различные варианты задачи на извлечение приманки из трубки с ловушкой [3, 31], которая может быть модифицирована разными способами, и задача в результате становится каждый раз новой для животного. Одно из преимуществ этой задачи – ее доступность для большего числа видов, что делает ее пригодной для сравнительных исследований; другое – уже упомянутая возможность менять дизайн установки и расширять диапазон предлагаемых задач.

Одна из особенностей изучения мышления в настоящее время состоит в том, что данные физиологических и психологических экспериментов дополняются благодаря привлечению методов полевой зоологии и когнитивной этологии.

Это особенно важно для понимания природы орудийного поведения. Наблюдения за спонтанным применением орудий в условиях свободного поведения показывают, что диапазон возможностей, например, шимпанзе и горилл гораздо шире, чем это следует из лабораторных экспериментов. Так, гориллы в неволе, но в условиях, приближенных к естественным, за 10 лет непрерывной видеорегистрации их свободного поведения продемонстрировали более 20 способов спонтанного использования различных предметов повседневного обихода. Важно отметить, что орудия применялись для самых разных целей, не только для получения недоступной пищи, но и для удовлетворения многих других потребностей, включая столкновения с сородичами, любознательность, достижение комфорта и т.п. [30].

В качестве еще одной новой тенденции можно отметить, что постепенно начинают применять эксперименты, проводимые стандартными методиками, но непосредственно в естественных для вида условиях [12]. Такой подход позволяет получать данные о животных, которые трудны для содержания в неволе, например клесты и совы [9, 10, 24]. Кроме того, в естественных условиях могут проявиться какие-то дополнительные стороны когнитивной деятельности, которые невозможно заметить в условиях лабораторного эксперимента, обедненных по сравнению с естественной средой. Так, например, при исследовании способности к обучению и обобщению, которое проводилось непосредственно в колонии на совершенно свободных серокрылых чайках (Larus glaucescens) на острове Топорков (Командорский ГПБЗ), была обнаружена, а затем изучена в эксперименте роль обучения путем наблюдения и подражания новым навыкам в формировании пищедобывательного поведения этих птиц. В докладе будут представлены результаты изучения в природе когнитивных способностей большеклювых ворон (Corvus brachyrhynchos), популяция которых на острове Шикотан может служить подходящим объектом для подобных исследований.

Таким образом, несмотря на сложность структуры такого психического процесса, как человеческое мышление, практически все компоненты этой структуры в той или иной степени встречаются у животных. Сочетание сравнительного подхода с применением комплекса разноплановых методик существенно уточняет и обогащает характеристику высших когнитивных способностей животных, что создает более обоснованную базу для сопоставления различных таксонов и обсуждения филогенеза этой формы психики животных [19].

Работа поддержана грантом РФФИ № 10-04-00747.

Литература

1. *Багоцкая М.С., Смирнова А.А., Зорина З.А.* Сравнительное исследование способности врановых птиц к решению задачи на подтягивание подвешенной приманки // Журн. высш. нервн. деят. 2010. Т. 60, № 3. С. 321–329.

2. *Багоцкая М.С., Смирнова А.А., Зорина З.А.* Врановые способны понимать логическую структуру задач на подтягивание закрепленной на нити приманки // Журн. высш. нервн. деят. 2010. Т. 60, № 5. С. 543–551.

3. *Багоцкая М.С., Смирнова А.А., Зорина З.А.* Изучение способности серых ворон (*Corvus cornix L.*) решать задачи на добывание приманки из трубки с ловушкой // Журн. общ. биологии. 2013. Т. 74, № 1. С. 23–33.

4. *Зорина З.А., Обозова Т.А.* Новое о мозге и когнитивных способностях птиц // Зоол. журн. 2011. Т. 90, № 7. С. 784–802.

5. *Зорина З.А., Обозова Т.А.* Вклад Л.В. Крушинского в изучение когнитивных способностей птиц и современное состояние этой проблемы // Формирование поведения животных в норме и патологии : к 100-летию со дня рождения Л.В. Крушинского (1911–1984) / сост. И.И. Полетаева, З.А. Зорина. М. : Языки славянских культур, 2013. С. 115–148.

6. *Зорина З.А., Смирнова А.А.* История и методы экспериментального изучения мышления животных // Современная экспериментальная психология : в 2 т. / под ред. В.А. Барабанщикова. М. : Институт психологии РАН, 2011. Т. 1. С. 61–87.

7. *Келер В.* Исследование интеллекта человекоподобных обезьян. М. : Комакадемия, 1930. 206 с.

8. *Крушинский Л.В.* Биологические основы рассудочной деятельности : эволюционный и физиолого-генетический аспекты поведения. Изд. 3-е. М. : Либроком, 2009. 283 с.

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

10. *Обозова Т.А., Смирнова А.А., Зорина З.А.* Клесты-еловики (Loxia curvirostra) способны к обобщению признака «больше» // Журн. высш. нервн. деят. 2009. Т. 59, № 3. С. 318–325.

11. *Смирнова А.А., Обозова Т.А.* Когнитивные способности птиц: использование понятий «сходство» и «различие» // Эволюционная и сравнительная психология в России : традиции и перспективы / под ред. А.Н. Харитонова. М. : Институт психологии РАН, 2013. С. 152–161.

12. *Фирсов Л.А., Чиженков А.М.* Очерки физиологической психологии. СПб. : Астер-Х, 2003. 220 с.

13. *Фирсов Л.А., Чиженков А.М.* Эволюция интеллекта: присущ ли разум животным? СПб. : Астер-Х, 2004. 125 с.

14. *Auersperg A.M.I., Szabo B., Bayern A.M.P. von, Kacelnik A.* Spontaneous innovation in tool manufacture and use in a Goffin's cockatoo // Current Biology. 2012. V. 22 (21). R903–R904.

15. *Bayern A.M.P. von, Heathcote R.J.P., Rutz Ch., Kacelnik A.* The Role of Experience in Problem Solving and Innovative Tool Use in Crows // Current Biology. 2009. V. 19, № 22. P. 1–4.

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

17. *Bluff L.A., Weir A.A.S., Rutz Ch. et al.* Tool-related Cognition in New Caledonian Crows // Comp. Cogn. Behav. Rev. 2007. V. 2. P. 1–25. doi: 10.10981rspb.2009.1953.

18. *Bräuer J., Call J.* Apes produce tools for future use // Am. J. Primatology. 2014. V. 9. doi: 10.1002/ajp.22341.

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

20. *Jacobs I., Osvath M.* The string-pulling paradigm in comparative psychology // J. Comparative Psychology. 2015. V. 129, № 2. P. 89–120.

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

22. *Obozova T.V., Smirnova A.A., Zorina Z.A.* Relational learning in the Glaucous-winged gull // Spanish J. Psychology. 2012. V. 15, № 3. P. 873–880.

23. *Obozova T., Smirnova A., Zorina Z., Wasserman E.* Analogical reasoning in amazons // Animal Cognition. Springer, 2015. Jun. doi: 10.1007/s10071-015-0882-0.

24. *Obozova T.A., Zorina Z.A.* Do Great Grey Owls Comprehend Means–end Relationships? // Int. J. Comparative Psychology. 2013. № 26. P. 197–201. URL: *http://www.ornithomedia.com/magazine/etudes/chouettes-sont-elles-aussi-intelligentes-que-corbeaux-perroquets-01323.html.

25. *Pepperberg I.M.* The Alex studies: Cognitive and communicative abilities of grey parrots. Cambridge, MA ; London, UK : Harvard Univ. Press, 1999; 2002. 434 p.

26. *Seed A.M., Boogert N.J.* Animal Cognition: An End to Insight? // Current Biology. 2013. V. 23, № 2. R67-R69.

27. *Smirnova A., Zorina Z., Obozova T., Wasserman E.* Crows spontaneously exhibit analogical reasoning // Current Biology. 2015. V. 25, № 2. P. 256–260. (IF=10).

28. *Smith B., Appleby R., Litchfield C.* Spontaneous tool-use: An observation of a dingo (Canis dingo) using a table to access an out-of-reach food reward // Behavioural Processes. 2001. doi: 10.1016/j.beproc.2011.11.004.

29. *Taylor A.H., Knaebe B., Gray R.D.* An end to insight? New Caledonian crows can spontaneously solve problems without planning their actions // Proc. R. Soc. B. 2012. V. 279. P. 4977–4981.

30. *Vancatova M.* Tool behaviour in higher primates // Вестник НГУ. Сер.: Психология. 2008. Т. 2, вып. 2. С. 61–69.

31. *Visalberghi E., Limongelli L.* Lack of comprehension of cause-effect relations in tool-using capuchin monkeys (Cebus apella) // J. Comp. Psychol. 1994. V. 108. P. 5–22.

32. *Volter C.J., Call J.* Problem solving in great apes (Pan paniscus, Pan troglodytes, Gorilla gorilla, and Pongo abelii): the effect of visual feedback // Anim. Cogn. 2012. V. 15. P. 923–936. doi: 10.1007/s10071-012-0519-5/.

33. *Weir A.A., Chappell J., Kacelnik A.* Shaping of hooks in New Caledonian crows // Science. 2002. V. 97(5583). P. 981.

34. *Zorina Z.A., Obozova T.A.* New Data on the Brain and Cognitive Abilities of Birds // Biology Bulletin. 2012. V. 39, № 7. P. 601–617.

Информативная ЭЭГ

Г.А. Иваницкий

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

Введение

Со времени первых опытов регистрации электрической активности головного мозга человека [1] стало ясно, что ЭЭГ как-то отражает текущее состояние психики человека. В частности, ритм частотой около 10 Гц (впоследствии названный альфа-ритмом) ослабляется («десинхронизируется») при умственном напряжении (а равно и при открывании глаз). Однако насколько специфично ЭЭГ отражает мыслительную деятельность?

На долгие годы в мировой науке укрепилось мнение, что электрическая активность мозга человека обладает малой специфичностью и отражает процессы общего характера, такие как уровень бодрствования или наличие сенсорного входа, а посему не несет сколь-нибудь полезной и точной информации о текущем состоянии психики. ЭЭГ сравнивали с «дымом от паровоза» или «шумом стадиона».

При этом клиническая электроэнцефалография успешно развивалась и быстро доказала свою не только полезность, но и незаменимость в качестве диагностического метода. Действительно, ЭЭГ позволяет выявлять органические поражения головного мозга, в первую очередь эпилепсию, разные формы которой обладают выраженными признаками на ЭЭГ, в том числе (что важно) и в отсутствие припадков. При этом традиционная клиническая ЭЭГ основывается на феноменологическом – опытном и описательном – подходе, при котором опыт и знания диагноста имеют решающее значение.

Разрушение представления о «бесполезности» ЭЭГ во всех приложениях, кроме клинического (в частности, о малой эффективности ЭЭГ-подхода к когнитивным исследованиям), проходило постепенно. Опишем кратко эту историю.

«Точечный» подход

В науке вообще и в современной психофизиологии в частности можно говорить о двух противоположных подходах к исследовательскому процессу, которые мы назовем «точечным» и «обобщенным». Первый из них, который многие называют *точным*, предметно исследует какой-либо конкретный процесс путем сравнения получаемых данных в двух мало отличающихся экспериментальных условиях (так называемый разностный подход). В психофизиологии экспериментальные условия разнятся наличием или отсутствием какой-либо конкретной психической функции в деятельности испытуемого. Стимулы вообще могут быть одинаковыми, могут отличаться только задания. Например, в работе [2] испытуемому необходимо было либо просто читать слова, написанные на экране, либо придумывать к ним ассоциации, например «молоток – стучать». В процитированной работе разница в заданиях проявилась в вызванных потенциалах (ВП) в нескольких областях и латентностях, обозначив электрографические признаки механизма вербальной ассоциации.

Работы по связи ВП с процессами восприятия, внимания и памяти начались задолго до процитированной выше работы – в конце 1950-х – начале 1960-х годов. Подробно исследованы и описаны отдельные длиннолатентные (более 50 мс) «когнитивные» компоненты ВП, такие, например, как N1 и P3. Было найдено, что первый отражает совокупную оценку физических свойств стимула, в частности его нестандартность. Второй – поведенческую значимость стимула для испытуемого. Более поздние компоненты (>400 мс) отражают процессы процедурной и семантической памяти [3].

Таким образом, по результатам исследований с применением ВП стало ясно, что элементарные (правильнее было бы выразиться «парциальные») психические процессы находят свое четкое и однозначное отражение в электрической активности головного мозга человека. В то же время в некоторых случаях классический метод ВП (при соответствующей постановке эксперимента) выявлял и более сложные процессы психики, например механизм возникновения субъективного ощущения [4].

«Точечный» подход применялся и к нативной ЭЭГ, а не только к ВП. Здесь необходимо упомянуть пионерскую работу академика М.Н. Ливанова [5], который впервые в мире экспериментально показал (в опытах на кроликах), что функциональная связь между отделами коры больших полушарий сопровождается синхронизацией ритмической активности в этих областях.

В то время как в нашей стране активно, на мировом уровне велись работы с использованием ЭЭГ и ВП, за рубежом с середины 1980-х годов в больших количествах стали публиковаться результаты, полученные с помощью разностного подхода и методов нейровизуализации (сначала ПЭТ, потом фМРТ). Процитируем пионерскую, ставшую классической работу [6], в которой использовалась та же парадигма, что и в работе [2] (исторически [6] появилась раньше, чем [2]). В этой работе были выявлены зоны (в лобной ассоциативной и височной ассоциативной областях коры больших полушарий мозга), ответственные за механизм вербальной ассоциации.

«Обобщенный» подход

Одновременно с этим стали появляться работы, в которых общий, сложный, многокомпонентный психический процесс *однозначно и точно* соответствовал некоторому сложному паттерну

активации мозга. Опять же, долгое время в России это были работы по ЭЭГ (и отчасти по МЭГ), за рубежом – по фМРТ (правда, в последнее время эта «асимметрия» стала выправляться).

Наши результаты такого рода были одними из первых в мире [7]. Остановимся на них подробнее.

На рис. 1 показана схема эксперимента по распознаванию характера осуществляемой мыслительной деятельности по частотно-пространственному рисунку ритмов ЭЭГ с использованием искусственной нейросети.

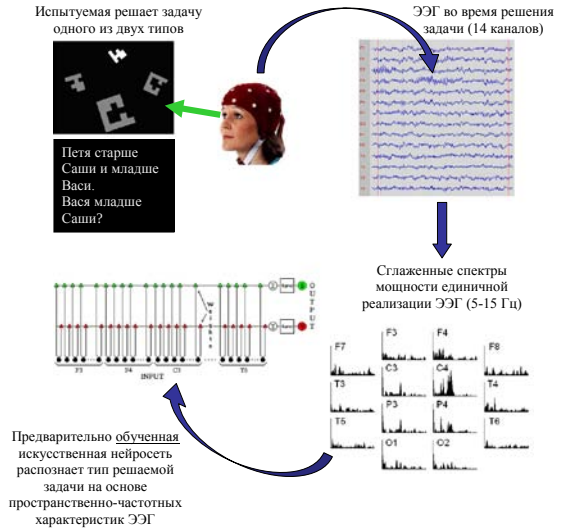


Рис. 1. Технология распознавания характера осуществляемой мыслительной деятельности по ритмическому паттерну ЭЭГ

На рис. 2 показан результат распознавания заданий восьми типов, четыре из которых вербальные, а четыре – пространственные. Тип мышления (пространственное или вербальное) инвариантно конкретного вида заданий распознается с надежностью 76 % (в среднем по 30 испытуемым). Два конкретных вида заданий *разного* типа распознаются с надежностью 86 % (цифра ≈85 % повторяется у нас во многих сериях экспериментов). Два конкретных вида заданий *одного* типа – с надежностью73 %.

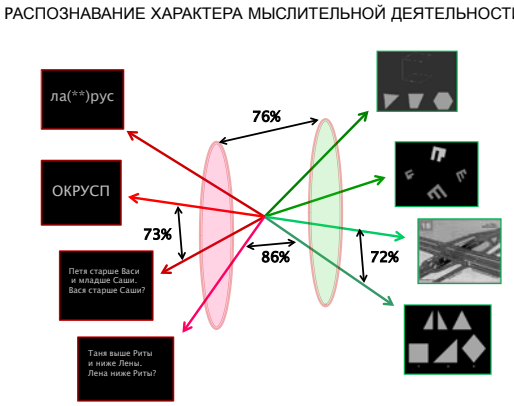


Рис. 2. Надежность распознавания видов выполняемых заданий и типов мышления по ритмическому рисунку ЭЭГ (средние по 30 испытуемым цифры)

Такой результат соотносится с картиной усредненной спектральной мощности ЭЭГ, наблюдаемой при выполнении разных заданий. На рис. 3 показаны спектральные кривые для четырех из восьми заданий, представленных на рис. 2. Видно, что два разных типа мышления (вербальное и пространственное) имеют у данного человека собственные черты: пространственное – пик частотой 11 Гц в центральных отведениях, вербальное – пик частотой 8 Гц в центральных и передних отведениях. Есть много других признаков, которые плохо видны невооруженным глазом, но которые выделяет и использует искусственная нейронная сеть.

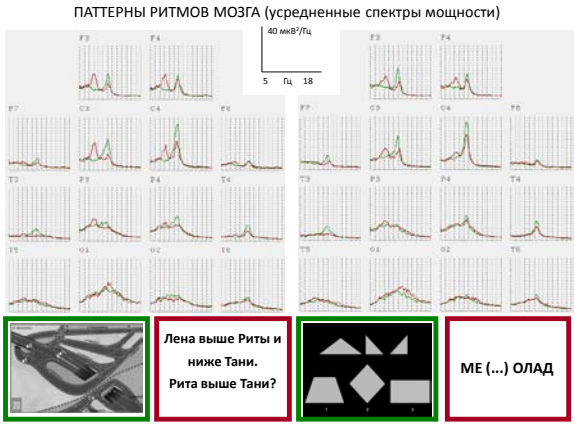


Рис. 3. Усредненные спектры мощности ЭЭГ при решении задач разного вида

Оказалось далее, что ритмические паттерны находятся друг с другом во вполне определенных соотношениях. Эти соотношения можно визуализировать, введя метрику на пространстве ритмических паттернов ЭЭГ и применив затем один из методов многомерного шкалирования – проекцию Сэммона [8]. В качестве расстояния между паттернами ритмов ЭЭГ использовался индекс различия, который, в свою очередь, вычислялся как общая оценка достоверности различия всех спектральных отсчетов [9]. На рис. 4 показаны два когнитивных пространства: а) построенное указанным методом на основе ЭЭГ 30 испытуемых («объективное» пространство); б) построенное на основе усредненной экспертной оценки 20 экспертов-психологов («субъективное пространство»). Эксперты оценили степень пространственности образности и вербальности каждого из 6 видов заданий, предъявляемых испытуемым в данной серии опытов, по десятибалльной шкале. Видно, что «субъективное» и «объективное» пространства практически совпали (векторный коэффициент корреляции двух констелляций равен 0,98).

Приведем один из результатов, полученных с помощью фМРТ с применением «обобщенного» подхода к анализу данных [10]. В этой работе проведено картирование зон активации мозга при просмотре видеоклипов. Характерные зоны активации, соответствующие разным категориям видеоряда (например, люди, животные, ведра и т.д.), были выделены с помощью последовательности статистических процедур. Оказалось, что разным категориям зрительных образов соответствуют

различные *паттерны* активации больших зон мозга (до 20 % его поверхности), а не отдельные его локусы. Затем зоны активации мозга были раскрашены в соответствии с цветами, примененными в семантическом древе (цветам соответствовали разные категории образов). В результате получили «семантическую карту мозга» (рис. 5).

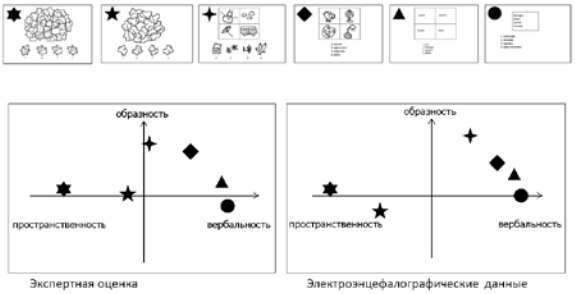


Рис. 4. Субъективно и объективно определенные когнитивные пространства. Значки разной формы обозначают разные виды заданий, которым присуща разная степень пространственности, образности и вербальности

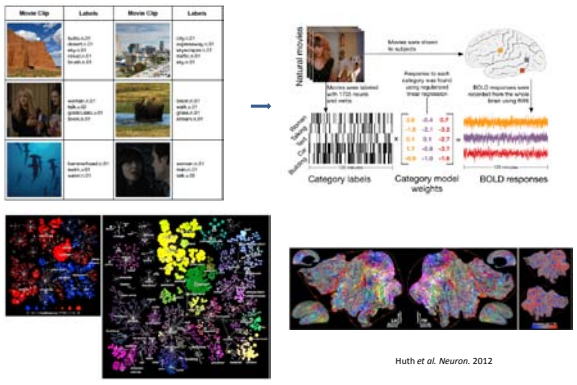


Рис. 5. Примеры просматриваемых видеоклипов (слева вверху); процедура выделения соответствующих им областей мозга, основанная на анализе независимых компонент (справа вверху); семантическое древо (слева внизу); семантическая карта мозга (справа внизу)

Таким образом, данные многих авторов, в том числе процитированные, однозначно говорят о том, что весьма сложные когнитивные эффекты *точно и воспроизводимо* кодируются сложными, но вполне определенными *паттернами* активации мозга человека. Эти паттерны, как правило, покрывают весь мозг, так как очевидно, что в сложных психических процессах задействованы все его участки. Для выявления таких «когнитивных» паттернов нужно использовать достаточно «продвинутые» методы обработки данных. Нельзя сказать, чтобы эти методы были очень сложны – большинство из них хорошо известны и давно и успешно применяются в других областях науки и техники. Но, во всяком случае, эти методы выходят за рамки традиционных корреляционных и вариационно-статистических подходов. Это методы распознавания образов, искусственного интеллекта, преобразования пространств и многие другие. Они применяются в психологии, экономике, лингвистике и, со все большей эффективностью, в информационных технологиях.

Общее и частное – единство противоположностей

Итак, электрическая активность мозга (а мы говорим все-таки о ней, методы нейровизуализации мы привлекли для поддержки), во всяком случае, не «дым от паровоза». Во-первых и как минимум, она точно и воспроизводимо кодирует отдельные конкретные функции психики, о чем свидетельствует большое количество литературных данных. Во-вторых, она кодирует и весьма сложные многокомпонентные психические явления. Кодирует адекватно, что фиксируется точными методами в конкретных экспериментах. Значит, в ЭЭГ всё есть, вся информация присутствует, хотя и в сильно замешанном виде.

Здесь мы и приходим к основной проблеме в экспериментальных когнитивных исследованиях – «принципу неопределенности». Мы или подробно изучаем конкретные, частные явления и знаем о них «всё», но не знаем, как из них складывается общее – сознание человека. Или видим (экспериментально, воспроизводимо, точно) отражение сложных психических процессов в виде сложных паттернов активации – и при этом не знаем (или знаем очень мало) о наполняющих их парциальных составляющих.

На наш взгляд, два подхода – «точечный» и «обобщенный» – должны идти навстречу друг другу. «Точечный» в одиночестве будет блуждать в потемках и заблудится, а «обобщенный» – порхать по верхам и не спустится на «грешную землю».

Литература

1. *Berger H.* Über das Elektrenkephalogramm des Menschen // Arch. Psychiat. Nervenkr. 1929. V. 87. P. 527–570.

2. *Abdullaev Y., Posner M.I.* Event-related brain potential imaging of semanting encoding during processing single words // Neuroimage. 1998. V. 7. P. 1–13.

3. *Vargha-Khadem F., Gadian D.G., Mishkin M.* Dissociation in cognitive memory: the syndrome of developmental amnesia // Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. 2001. V. 356. P. 1435–1440.

4. *Иваницкий А.М.* Мозговые механизмы оценки сигналов. М. : Медицина, 1976. 298 с.

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

6. *Posner M.I., Raichle M.E.* Images of Mind. Scientific American Books, 1997. 257 p.

7. *Иваницкий Г.А.* Распознавание типа решаемой в уме задачи по нескольким секундам ЭЭГ с помощью обучаемого классификатора // ЖВНД им. И.П. Павлова. 1997. Т. 47. С. 743–747.

8. *Sammon J.W.* A nonlinear mapping for data structure analysis // IEEE Transactions on Computers. 1969. V. 18. P. 401–409.

9. *Роик А.О., Иваницкий Г.А., Иваницкий А.М.* Когнитивное пространство человека: совпадение моделей, построенных на основе анализа ритмов мозга и на психометрических измерениях // Рос. физиолог. журн. им. И.М. Сеченова. 2012. Т. 98, № 11. С. 1314–1328.

10. *Huth A.G., Nishimoto S., Vu A.T., Gallant J.L.* A Continuous Semantic Space Describes the Representation of Thousands of Object and Action Categories across the Human Brain // Neuron. 2012. V. 76, № 6. P. 1210–1222.

Подбарьерный переход в аппарате мышления

Е.Д. Казимирова

Исследовательская группа «Нейросемантика», Москва
tidenwiden@gmail.com

Проблема творческого мышления и его механизмов – одна из самых интригующих проблем в области когнитивных наук. Насколько правильно доверять выводам, которые мы делаем интуитивно? Можем ли мы увеличить свою креативность, управлять ею? Ответы на эти вопросы будут появляться по мере углубления наших представлений о том, что происходит с информацией в когнитивной системе, когда мы мыслим не строго логически, а иррационально.

Для развития искусственных интеллектуальных систем (ИИС) также было бы полезно понимать природу творчества и интуиции. Это расширило бы возможности ИИС генерировать гипотезы и продуцировать новое знание, сблизило бы искусственный интеллект с естественным, снимая пугающие различия между естественным и искусственным разумом.

В настоящей работе мы обсуждаем некоторые особенности творческого мышления, опираясь на модель когнитивной системы, описанную Д.С. и О.Д. Чернавскими.

Аппарат мышления, рассматриваемый в модели Д.С. и О.Д. Чернавских [1], представляет собой иерархическую систему образов и соответствующих им символов. С нашей точки зрения, имеет смысл выделить внутри образа также составляющие его части – атрибуты этого образа.

Мысль в рамках этой модели можно определить как образование новых констелляций элементов в системе символов, образов и их атрибутов. В работе [2] мы показали, что различные сочетания символьно-образной архитектуры аппарата мышления можно сопоставить с разными лингвистическими и тем самым мыслительными феноменами. Так, сочетание символ – атрибут этого символа может быть уподоблено метонимии (ситуация, когда мы обозначаем целое по его части), объединение двух символов и их атрибутов в единое целое – метафоре (в этом случае мы переносим признаки одного символа на другой) и т.д.

Сравним, как может происходить работа с информацией в том случае, когда мы мыслим рационально, и в том, когда мыслим творчески, то есть генерируем новое знание или представления.

При рациональном мышлении мы, главным образом, систематизируем информацию.

Например, мы можем определить по существенным признакам (атрибутам) принадлежность животного – или любого другого явления, сущности – к определенному классу. Говоря, что все люди смертны, Сократ человек и, следовательно, он смертен, мы выстраиваем и исследуем иерархию символов и признаков.

Следует отдельно отметить, что символы играют в такой систематизации определяющую и разделяющую роль. В каком-то смысле они – пунктуация в пространстве когнитивной системы. В самом деле, если множества атрибутов пересекаются (так как разные образы могут обладать одинаковыми признаками), то различить такие пересекающиеся множества можно только в том случае, если они маркированы символами. С нашей точки зрения, это весомый довод в пользу гипотезы о существовании нейронов, в информационном отношении играющих роль символов.

Итак, именно структура информации подвергается анализу в ходе умозаключений, которые принято называть рациональными.

Творческое же мышление в большой степени иррационально и не описывается только отношениями символов разных уровней. В творческом мыслительном процессе большую роль играют не нисходящие связи (что к какому классу принадлежит), а ассоциативные, горизонтальные. Слово «горизонтальный» появляется потому, что ассоциативный переход происходит на одном уровне абстракции.

Такие горизонтальные переходы возникают и между образами, далеко отстоящими друг от друга в семантическом отношении – ведь общий атрибут может найтись и у объектов из разных классов. При этом возникают совершенно новые, кросстаксонные, сочетания элементов когнитивной архитектуры – то есть новые образы, которые и принято называть игрой и плодом воображения. Приведем в пример Черепаху Квази из сказки Льюиса Кэрролла «Алиса в Стране чудес» – наполовину черепаху, наполовину теленка. Другой пример: если рациональный анализ говорит нам, что кит – не рыба, так как у них есть разные существенные признаки (хотя есть и сходные), то в сказке Ершова появляется рыба-кит, именно потому, что у этих сущностей есть общие признаки. Горизонтальным переходом можно объяснить и то, что метафора, один из главных инструментов творческого мышления, по определению Н.Д. Арутюновой [3], «работает на категориальном сдвиге», перешагивая через таксономические границы. Например, такой общий признак, как движение вперед, позволяет нам уподобить страну кораблю.

Итак, если символы формируют каркас информационного пространства и делят его на классы и подклассы, то ассоциативные переходы позволяют перейти из одного класса объектов в другой, несмотря на разделяющую роль символов. В ходе такого мыслительного процесса возникают новые констелляции элементов когнитивной архитектуры. Отметим, что новое сочетание атрибутов может привести и к образованию нового символа (понятия).

Переход от одного образа к другому, происходящий через ассоциативную связь и игнорирующий семантические (смысловые) связи и иерархию символов, назовем *подбарьерным переходом*. Слово «барьер» появляется потому, что символы разделяют и ограничивают разные образы и/или классы объектов, играя в какой-то мере роль барьеров в информационном континууме. Например, мы хорошо понимаем, что страна – не корабль. Однако в процессе творческого мышления мы не следуем заданной информационной архитектуре (не исследуем строго, как атрибутируются символы и в каком отношении они находятся), а осуществляем дрейф по признаковому пространству, используя ассоциативные связи.

Констелляции элементов символьно-образной архитектуры, возникающие благодаря подбарьерному переходу в когнитивной системе, и порождают широкий спектр феноменов творческого и интуитивного мышления.

Литература

1. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Рожило Я.А.* Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Часть II : Понятия «образ» и «символ» как инструменты моделирования процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Сложные системы. 2012. № 2. С. 47–67.

2. *Казимирова Е.Д.* Отношения элементов символьно-образной архитектуры аппарата мышления и некоторые языковые феномены // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2015. № 4. С. 35–37.

3. *Арутюнова Н.Д.* Метафора и дискурс // Теория метафоры. М., 1990.

Результаты выполнения мануальных тестов на программно-аппаратном комплексе «Hand-tracker»

С.Я. Калинина[2], В.А. Антонец[1], В.Н. Григорьева[2]

[1] Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород
[2] Нижегородская государственная медицинская академия Минздрава России

Введение

У 30 % пациентов с острым нарушением мозгового кровообращения (ОНМК) снижается социальная и психологическая адаптация, утрачивается трудоспособность. Активность больных данной патологией ограничивается нарушением моторной функции верхней конечности. По данным В.В. Клочкова и соавт. [1], полноценное восстановление утраченной функции происходит лишь у 20 % больных. Для дополнительной диагностики и реабилитации пациентов с ОНМК был разработан программно-аппаратный комплекс «Hand-tracker» [2]. Данный комплекс включает в себя программу, управляемую двумя джойстиками со специальными насадками, имитирующими повседневные навыки. Особенности выполнения заданий, предлагаемых в программе, на данный момент не изучены, но подобные сведения позволили бы количественно охарактеризовать различные неврологические нарушения и разработать методику применения «Hand-tracker» при реабилитации больных.

Цель – определить особенности выполнения теста совмещения фигур на программно-аппаратном комплексе «Hand-tracker» у пациентов с ОНМК с нарушением функции руки.

Методы и материалы

В исследовании принимали участие 42 испытуемых, которые были разделены на 2 группы: первая группа (22 человека) – пациенты с цереброваскулярной патологией (ОНМК по ишемическому и геморрагическому типу) (средний возраст (64 ± 10) года), вторая группа, контрольная (20 человек) – здоровые испытуемые (средний возраст (58 ± 9) лет). Разница по возрасту между выделенными группами была статистически не значима. Для диагностики острого нарушения мозгового кровообращения применялся неврологический осмотр и мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ).

Каждый испытуемый однократно выполнял тест совмещения фигур на программно-аппаратном комплексе «Hand-tracker». Обследуемого просили совместить 2 фигуры на экране ноутбука настолько точно, насколько он сможет. Совмещенные изображения удерживались в течение 5 секунд. Ограничений на время достижения совмещения фигур не вводилось. Отказа от выполнения задания или его досрочного завершения не наблюдалось.

При выполнении задания отмечалось изменение расстояния между контурами изображений от времени. За показатель точности совмещения изображений было принято значение квадрата отклонения данной разницы от 0 мм, которое усреднялось по пятисекундному интервалу после совмещения изображений. Полученное значение было обозначено как достигнутая точность совмещения. Кроме того, для каждого обследуемого программно определялось время от начала эксперимента до момента, когда совмещение изображений первый раз стало равным нулю.

За критерий диагностики нарушения точности совмещения изображений принято значение, наблюдавшееся менее чем у 5 % здоровых испытуемых, а именно величина достигнутой точности совмещения в 1,6 мм. То есть нарушение точности совмещения изображений диагностировалось в случае, если достигнутая точность совмещения была равна или превышала 1,6 мм.

За критерий диагностики нарушения времени достижения совмещения изображений принято значение в 76 с, как наблюдавшееся менее чем у 5 % здоровых испытуемых.

Результаты

Среди испытуемых 1-й группы у 9 из 22 (41 %) пациентов имел место диагноз ОНМК по ишемическому типу в бассейне левой средней мозговой артерии, у 7 из 22 (32 %) – ОНМК по ишемическому типу в бассейне правой средней мозговой артерии, у 5 из 22 (23 %) больных – ОНМК по ишемическому типу в вертебробазилярной системе и у 1 из 22 (4 %) больных – ОНМК по геморрагическому типу.

У 16 из 22 (72 %) пациентов причиной дисфункции верхней конечности являлся умеренный или выраженный парез, у 5 из 22 (23 %) пациентов – изолированная или сочетающаяся с легким парезом апраксия и у 1 из 22 (5 %) пациента – чувствительные нарушения, сочетающиеся с легким парезом.

Достигнутая точность совмещения и среднее время достижения совпадения фигур статистически значимо различались среди испытуемых 1-й и 2-й групп, $p < 0{,}001$, $p = 0{,}011$.

Нарушение точности совмещения фигур диагностировано лишь у 5 из 22 (23 %) обследуемых с нарушениями функции верхней конечности. При этом причиной нарушения функции руки у них был умеренный или выраженный парез. Среди 16 больных с умеренным или выраженным парезом у остальных 11 (69 %) нарушений точности выполнения теста по совмещению фигур не наблюдалось. Среди больных, ведущей причиной дисфункции верхней конечности которых являлась

апраксия и чувствительные изменения, отклонений при выполнении предложенного задания не наблюдалось ни в одном случае.

У 18 из 22 (82 %) пациентов выявлено увеличение времени достижения совмещения изображений, среди них 14 из 16 (87,5 %) пациентов с умеренным и выраженным парезом, 3 из 5 (60 %) – с апраксией и один больной с чувствительными нарушениями (100 %). При сравнении подгрупп пациентов с различной причиной дисфункции руки статистически значимой разницы не обнаружено.

Пациенты, у которых апраксия являлась ведущей причиной дисфункции руки, имели лучшую достигнутую точность совмещения изображений по сравнению с пациентами с парезом руки (p = 0,02), и меньшее по сравнению с ними время достижения совмещения изображений (p = 0,043).

Заключение

Предлагаемый в программно-аппаратном комплексе «Hand-tracker» тест совмещения изображений оказался нечувствительным по достигнутой точности совмещения при выявлении пациентов с умеренным или выраженным парезом – точность совмещения фигур снижалась лишь у 23 % пациентов. Полученный результат говорит о том, что предлагаемые обследуемым задания требуют доработки.

Однако тест совмещения фигур оказался чувствительным по времени достижения совмещения, что позволяет количественно определить неврологические нарушения примерно у 80 % пациентов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-14-12063 офи_м.

Литература

1. *Клочков А.С., Черникова Л.А.* Роботизированные и механотерапевтические устройства для восстановления функции руки после инсульта // Рус. мед. журн. 2014. № 22. С. 1539–1592.

2. *Антонец В.А., Полевая С.А., Казаков В.В.* Hand-Tracking : исследование первичных когнитивных функций человека по их моторным проявлениям. М. : Ин-т психологии РАН, 2011. С. 39–54.

Применение многомасштабного корреляционного анализа к обработке электрических сигналов с поверхности мозга животных при исследовании посттравматической эпилепсии

М.В. Комарова, И.Г. Комольцев, А.О. Тишкина

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

Введение

Одной из характеристик работы головного мозга, которая может способствовать пониманию происходящих в нём процессов, является электрическая активность. Регистрация биоэлектрических потенциалов может проводиться как с помощью поверхностных скальповых электродов методом электроэнцефалографии (ЭЭГ), так и с помощью вживлённых эпидуральных электродов методом электрокортикографии (ЭКоГ). Будучи неинвазивной, ЭЭГ широко применяется в клинической практике в качестве рутинного метода диагностики эпилепсии. В то же время использование эпидуральных электродов позволяет регистрировать суммарный электрический потенциал меньшего количества нейронов, в том числе и локальные интериктальные эпилептические паттерны, которые могут не регистрироваться скальповыми электродами, но иметь важное прогностическое значение. Поэтому в лабораторных исследованиях на животных предпочтение отдаётся электрокортикографии. Далее при упоминании обоих методов употребляется наиболее распространённый термин ЭЭГ.

Сигнал на электроде является сложной суммой сигналов от множества источников – нейронов, электрические свойства которых достаточно хорошо изучены в масштабах отдельной клетки, но механизмы коллективной активности практически не выяснены. Соответственно, обработка такого многокомпонентного сигнала невозможна без применения анализирующих методов. Клинический анализ ЭЭГ, используемый для диагностики эпилепсии, заключается в просмотре записей экспертом и нахождении характерных эпилептических разрядов во время приступа и других изменений в межприступный период.

Такого метода оказывается недостаточно для формирования полной диагностической картины. Например, прогнозирование посттравматической эпилепсии (ПТЭ) в отдалённом периоде после черепно-мозговой травмы в клинической практике вызывает большие затруднения. Для того чтобы получить какое-либо понимание механизмов возникновения и развития болезни, обнаружить предикторы развития ПТЭ и вовремя назначить соответствующее лечение, проводятся исследования на животных моделях. Одним из показателей состояния животного является ЭЭГ, на котором эпилепсия наиболее ярко обнаруживается в виде комплексов «пик – волна». Появление такого комплекса обусловлено возникновением синхронной активности большого числа нейронов, которая как раз и служит причиной эпилептических припадков.

Для анализа записей ЭЭГ, зарегистрированных во время эксперимента на животной модели ПТЭ, требуется метод, способный автоматически выявлять характерные эпилептические паттерны на полученных сигналах электрической активности. Метод должен иметь небольшое время реализации, так как длительность записей достигает недели и более, в зависимости от продолжительности эксперимента.

В качестве такого метода может рассматриваться многомасштабный корреляционный анализ (МКА), обладающий рядом подходящих характеристик, которые позволяют применять его на практике.

Принцип метода

Корреляционный анализ применяется для решения обширного класса задач и активно развивается в различных направлениях. В технике обработки сигналов корреляционные функции предоставляют возможность находить и выделять сигналы на фоне шума, получать спектральные плотности энергии, выявлять скрытые периодичности в сигналах и определять другие характеристики сигнала(-ов).

В частности, корреляционный метод предлагается использовать для обнаружения на записях ЭЭГ характерной для эпилепсии пик-волновой активности. Сейчас разрабатываются и испытываются новые математические модели с целью усовершенствования корреляционного подхода.

При всём разнообразии арсенала корреляционных методов большинство из них сводится к оценке и исследованию автокорреляционной или взаимной корреляционной функций.

По определению, взаимная корреляционная функция сигналов $x(t)$ и $y(t)$ в точке t_0 в зависимости от сдвига по времени τ одного сигнала относительно другого имеет вид [1]

$$C_{xy}(t_0,\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t')y(t'-\tau)dt'. \qquad (1)$$

При $y(t) = x(t)$ получаем автокорреляционную функцию. Если $x(t)$ – периодическая функция, то при сдвиге τ, кратном периоду этой функции, модуль автокорреляционной функции принимает максимальное значение, т.е. функция автокорреляции будет являться периодической функцией, причём её период будет в точности равен периоду функции $x(t)$.

Автокорреляционная функция является выразительным средством отображения участков сигнала с периодичностью, которая может остаться незамеченной в структуре многокомпонентного сигнала. На временных интервалах, соответствующих таким участкам, сигнал может быть представлен в виде последовательности импульсов, волн или каких-либо других фрагментов, причём соседние фрагменты почти повторяют друг друга по форме. В таком случае сигнал называют квазипериодическим, а длительность фрагмента – локальным периодом, так как на временах, превышающих его во много раз, фрагменты уже могут сильно различаться и периодичность нарушается.

Отличительной особенностью многомасштабного корреляционного анализа (МКА) является подход к оценке автокорреляционной функции.

Традиционная оценка автокорреляционной функции для сдвига τ строится по взятым на интервале $2T$ данным $x(t)$, $-T \le t \le T$:

$$C_t(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t')x(t'-\tau)dt'. \qquad (2)$$

Для удобства представим её в симметричном виде по отношению к коррелируемому фрагменту сигнала (рис. 1):

$$C_t(\tau) = \frac{1}{2T-1} \int_{-T+\tau/2}^{T-\tau/2} x(t'-\tau/2)\,x(t'+\tau/2)\,dt'. \qquad (3)$$

Качество оценки будет ухудшаться по мере увеличения сдвига, так как с ростом τ уменьшается эффективное количество усредняемых данных, равное $2T - \tau$ [2].

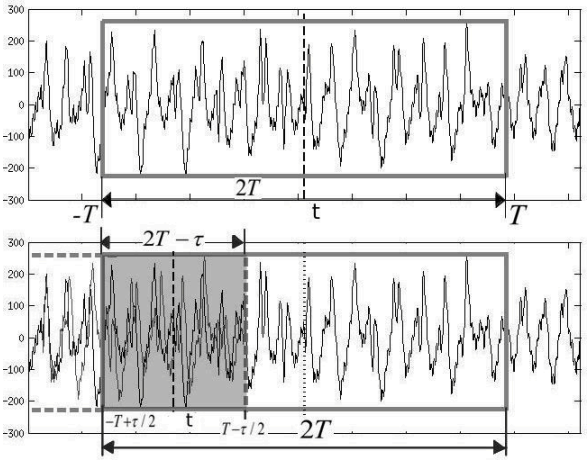


Рис. 1. Смещение сигнала $x(t)$ на τ назад на рассматриваемом интервале от $-T$ до T. Затемнённой областью показаны коррелируемые фрагменты, в центр которых для удобства помещается точка отсчёта t

При реализации МКА сдвигаемые интервалы выбираются слева ($x(t)$, $-2T \le t \le 0$) и справа ($x(t)$, $0 \le t \le 2T$) от анализируемого момента времени t и проводится оценка корреляционной функции локально прошлого и локально будущего отрезка сигнала. Тогда эффективная длина коррелируемых фрагментов данных равна сдвигу τ и увеличивается вместе с ним (рис. 2), достигая максимального значения при $\tau = 2T$, что является длиной каждого локального отрезка.

Оценка корреляционной функции в МКА [2]

$$C_t(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} x(t'-\tau/2)\,x(t'+\tau/2)dt'. \qquad (4)$$

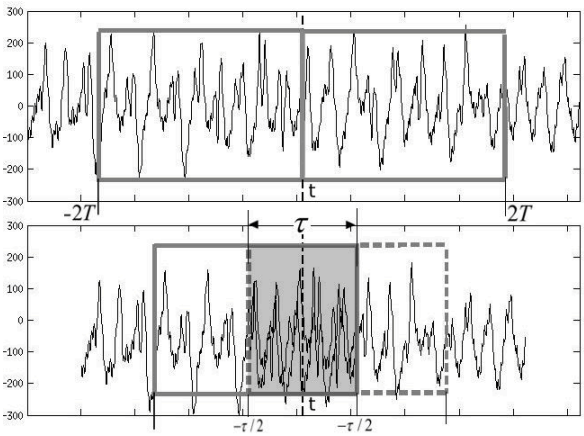


Рис. 2. Смещение локально будущего и локально прошлого отрезков сигнала $x(t)$ длительностью $2T$ относительно друг друга на τ. Затемнённой областью показаны коррелируемые фрагменты

Стоит заметить, что функция не зависит от величины $2T$, поэтому в дальнейшем будем считать длительность одного локального отрезка равной T. Также отсутствует явная зависимость от момента времени t, потому что он принимается за начало координат, но от его выбора зависит вид коррелируемых отрезков.

Таким образом на заданном временном интервале можно для каждого момента времени t рассчитать $C_t(\tau)$. Графическое представление полученных функций на плоскости «время – смещение» должно отображать возможные периодичности в структуре анализируемого участка сигнала. Смещение τ не может превышать выбранной длительности локальных сигналов, т. е. $\tau_{max} = T$. Также существует некоторое значение τ_{min}, задающее минимальное количество усредняемых данных, при котором ошибка оценки принимается допустимой.

Нужно учитывать, что на практике сигнал является дискретным и представляет собой последовательность значений $x(i)$ (для ЭЭГ это разность потенциалов), зарегистрированных через равные промежутки времени $\delta = 1/f$, где f – частота дискретизации сигнала.

Так, при частоте дискретизации $f = 250$ с$^{-1}$ анализ всего одной секунды записи потребует вычисления 250 корреляционных функций, каждая из которых, в свою очередь, является результатом $N \cdot N$ умножений, где N – длина локальных отрезков в отсчётах ($N = T \cdot f$ при $T = 1{,}5$ с, $N = 375$). Отбирая для анализа только часть точек, например один отсчёт через каждые 0,1 с, мы почти не теряем информации о сигнале, но существенно сокращаем количество производимых операций, требования к вычислительным ресурсам и время анализа. Более того, МКА может быть проведён с помощью наиболее быстрых алгоритмов.

Алгоритм обработки

Одним из важнейших критериев эффективности процесса обработки является возможность его численной реализации с использованием доступных ресурсов за минимальное время. Для вычисления многомасштабных корреляций существует быстрый алгоритм, в основу которого положены связь корреляционной функции со свёрткой и теорема свёртки.

Рассмотрим сигнал $x(t)$ и его локальные прошлый и будущий отрезки относительно момента времени $t = i\delta$. Выделим последовательность $a(n) = x(i+n),\ n = 0, \ldots, N-1$, и последовательность $b(n) = x(i-n),\ n = 0, \ldots, N-1$.

Корреляционная функция $C_t(\tau)$ может быть найдена по дискретной формуле:

$$C_i(k) = \frac{1}{k\delta}\sum_{n=0}^{k} a(n)b(k-n), \quad k = 0, \ldots, N-1. \tag{5}$$

Без учёта коэффициента $1/\tau = 1/k\delta$ формула (5) есть выражение для свёртки последовательностей $a(n)$ и $b(n)$. Как уже упоминалось, прямой расчёт по такой формуле требует $N \cdot N$ операций умножения. Поэтому воспользуемся теоремой свёртки, которая говорит о том, что спектр циклической свертки есть произведение спектров сворачиваемых сигналов, и будем проводить вычисления многомасштабных корреляций с помощью быстрого алгоритма, схема которого представлена на рис. 3.

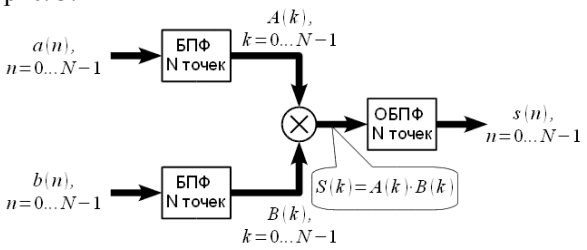


Рис. 3. Вычисление циклической свёртки с использованием теоремы свёртки и алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) и обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ)

Дискретное преобразование Фурье имеет вид

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n)\exp(-j\frac{2\pi}{N}nk), \quad k = 0, \ldots, N-1. \tag{6}$$

Из спектра можно получить сигнал обратным дискретным преобразованием Фурье:

$$s(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} S(k)\exp(j\frac{2\pi}{N}nk), \quad n = 0, \ldots, N-1. \tag{7}$$

Для эффективной реализации таких преобразований существуют алгоритмы с минимальным временем вычисления: быстрое преобразование Фурье (БПФ) и обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ). Для вычисления одного БПФ требуется $N \cdot \log_2 N$ операций. Применение их к вычислению циклической свёртки позволяет значительно ускорить процесс [3].

Однако не для всех N существуют эффективные алгоритмы БПФ. Поэтому исходные последовательности $a(n)$ и $b(n)$, $n = 0, \ldots, N-1$, дополняются до длины $R = 2^L$. Линейная свёртка последовательностей $a(n)$ и $b(n)$, $n = 0, \ldots, R-1$, может быть рассчитана через циклическую, если увеличить длину последовательностей в 2 раза дополнением нулями (рис. 4, *а*). После таких дополнений применяется БПФ для нахождения спектров локально будущего и локально прошлого сигналов $-S_F(f)$ и $S_P(f)$ соответственно (рис. 4, *б*). Перемножив эти спектры, получаем спектр ненормированной корреляционной функции, который сам по себе может служить источником информации о периодичности сигнала, но в частотных характеристиках. Результатом процедуры ОБПФ будет последовательность, из которой нужно взять только N первых отсчётов. После нормировки на τ и отсечения таких τ, что $\tau < \tau_{min}$, получим вид функции $C_t(\tau)$ в точке t (рис. 4, *в*).

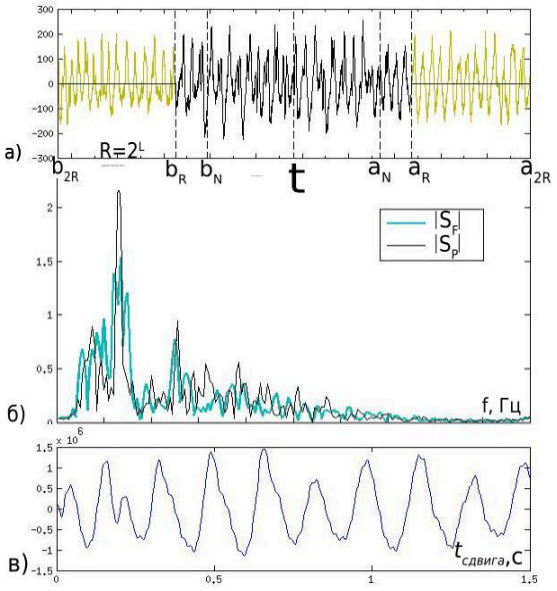


Рис. 4. Применение вычислительного алгоритма: *а*) выбор массивов данных для вычисления циклической свёртки; *б*) фурье-спектры локально прошлого ($|S_P(f)|$) и локально будущего ($|S_F(f)|$) отрезков сигнала; *в*) нормированная корреляционная функция $C_t(\tau)/\tau$. Здесьτ обозначается как $t_{сдвига}$.

В результате получим корреляционные функции, которые могут быть представлены на плоскости $t - \tau$.

На рис. 5 представлен результат применения алгоритма МКА к отрезку сигнала ЭЭГ, содержащему эпилептический разряд, который в многомасштабном представлении имеет ярко выраженную линейчатую структуру. На основе представления можно судить о границах разряда, динамике его частоты, а на представлении длительных участков сигнала можно обнаруживать такие разряды по характерной «лесенке», что может быть ис-

пользовано для автоматического выделения эпилептических разрядов.

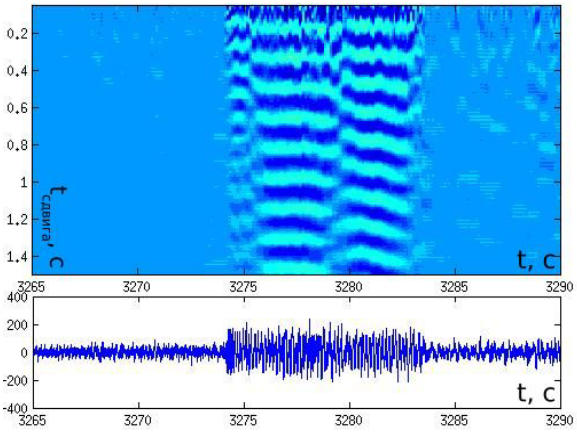


Рис. 5. Представление многомасштабных корреляций на плоскости «время – смещение», внизу – анализируемый отрезок сигнала. Отсчёты по времени следуют с шагом 0,1 с, смещение варьируется от 0,05 до 1,5 с

В работе использованы идеи и наработки В.Е. Анциперова (Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН), за что выражаем ему особую благодарность.

Поддержано грантом РНФ № 14-25-00136.

Литература

1. *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях : 2 т. М. : Мир, 1983. Т. 1. С. 312.

2. *Анциперов В.Е.* Новый метод оценки корреляционных функций в задачах обнаружения и обработки радиолокационных и связных сигналов // Доклады III Всеросс. конф. «Радиолокация и радиосвязь» (26–30 октября 2009). М., 2009. С. 887–891.

3. *Анциперов В.Е.* Многомасштабный корреляционный анализ нестационарных, содержащих квазипериодические участки сигналов // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 1. С. 73–85.

Вегетативное обеспечение процесса социального взаимодействия в ситуации монолога и полилога

М.Е. Королева[1], А.В. Бахчина[1], С.В. Хоборов[1], С.Б. Парин[1,2], С.А. Полевая[1,2]

[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2]НИИ прикладной и фундаментальной медицины Нижегородской государственной медицинской академии

Вегетативное обеспечение деятельности – это способность вегетативной нервной системы к долговременному поддержанию вегетативной реактивности на определенном уровне, обеспечивающем эффективную реализацию актуальной функции [1].

Социальное взаимодействие – это процесс информационного и материального обмена между участниками взаимодействия. Ю. Хабермас писал, что это деятельность, направленная на достижение общего согласия и взаимопонимания между участниками общения [2].

Для того чтобы произошло взаимодействие, зачастую хватает одного только присутствия рядом других людей. Эффект влияния присутствия на состояние человека был замечен довольно давно. Еще в конце XIX века Норман Триплетт заметил и описал феномен социальной фасилитации: присутствие других облегчает действия одного, способствует им. Активность индивида повышается в условиях ее осуществления в окружении других людей по сравнению с обычным уровнем этой же активности при индивидуальном осуществлении. Чаще всего социальная фасилитация обнаруживается в ситуации соревнования с другими [3, 4].

Однако показано и наличие противоположного эффекта – сдерживания, торможения действий индивида под влиянием присутствия других, что получило название эффекта социальной ингибиции [3].

Таким образом, процесс социального взаимодействия приводит к изменениям на эмоциональном и поведенческом уровне. Однако остается открытым вопрос о его влиянии на функциональное состояние организма. И важно выявить, в чем именно выражаются данные влияния и играют ли какую-либо роль в динамике функционального состояния индивидуальные особенности человека.

В исследовании рассматривается динамика функционального состояния человека в процессе монолога в условиях публичного выступления и полилога в условиях группового обсуждения.

Динамика функционального состояния человека в процессе монолога

Публичное выступление – особая форма деятельности в условиях непосредственного общения индивида с аудиторией [5]. Специфика публичного выступления заключается в следующем: включенность вербальных, паравербальных и невербальных выразительных компонентов; наличие зрителей и влияние их эмоций и поведения на выступающего [5, 6].

В рамках исследования функционального состояния человека в процессе публичного выступления нами было проведено 2 серии экспериментов:

1) в контексте естественной деятельности (студенты во время представления исследовательских работ на защитах и конференциях, 25 человек в возрасте от 13 до 25 лет);

2) в контексте публичного выступления, смоделированного в лаборатории, при зачитывании выданного текста и рассказе его по памяти (16 студентов в возрасте от 17 до 19 лет).

В первой серии экспериментов были использованы методы: компьютерная кампиметрия, компьютерная латерометрия и беспроводная кардиоинтервалография.

Компьютерная кампиметрия – измерение дифференциальных порогов цветоразличения [7].

Компьютерная латерометрия – измерение пространственных характеристик пространственного слуха, функциональной межполушарной асимметрии [7].

Беспроводная кардиоинтервалография – мониторинг показателей вегетативной регуляции, уровня адаптационных ресурсов организма с помощью мобильного датчика сердечного ритма HxM BT (heart rate monitor) [8].

До и после выступления испытуемые проходили тестирование функционального состояния с помощью методов компьютерной кампиметрии и компьютерной латерометрии, и на протяжении всего измерения проводился непрерывный мониторинг сердечного ритма.

Во второй серии экспериментов использовался метод беспроводной кардиоинтервалографии: до, во время и после выполнения задания проводился непрерывный мониторинг сердечного ритма. Задача испытуемых состояла в рассказе текста, выданного экспериментаторов, перед аудиторией студентов.

Процесс обработки результатов предполагал выявление изменения коэффициента межполушарной асимметрии и дифференциальных порогов цветоразличения до и после публичного выступления. Результаты мониторинга сердечного ритма анализировались с помощью спектрального анализа. Далее рассматривалась динамика суммарной мощности спектра вариабельности сердечного ритма и индекса вегетативного баланса [9].

В результате было выявлено следующее.

Контекст публичного выступления приводит к значимому снижению коэффициента межполушарной асимметрии (p = 0,025). Это является маркером стрессогенности изучаемого контекста [7].

У 73 % испытуемых, непосредственно выступающих на публике, наблюдается снижение общей мощности сердечного ритма при одновременном повышении индекса вегетативного балан-

са. Сопоставляя данные результаты с исследованиями сердечного ритма в оптимальных и экстремальных условиях [8, 10], можно сказать, что данная динамика характерна для стресса.

В условиях моделирования исследуемого контекста динамика параметров сердечного ритма, характерная для стресса, наблюдается, но не является доминирующей (15,6 %). То есть результаты лабораторного эксперимента не воспроизводят результаты измерений, проводимых в контексте естественной деятельности.

Динамика функционального состояния человека в процессе полилога

Полилог – это дискуссия или беседа трех и более участников [11]. Это одна из наиболее часто встречающихся и сложных для изучения форм коммуникации.

В нашем исследовании мы выявляем особенности динамики сердечного ритма участников группового обсуждения.

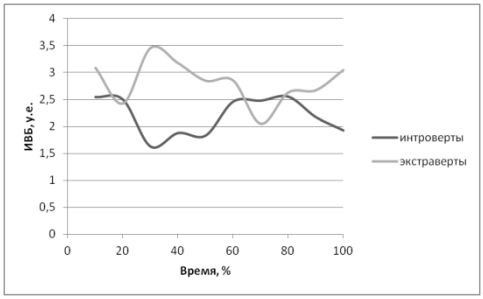
Нами была проанализирована постоянная рабочая закрытая группа Нижегородского горного клуба, состоящая из 8 человек (4 девушки и 4 юноши в возрасте от 21 до 25 лет), в процессе социального взаимодействия при совместном планировании деятельности группы.

Каждый участник прошел непрерывное измерение сердечного ритма в процессе группового планирования с помощью мобильного датчика сердечного ритма HxM BT (heart rate monitor). Затем была проведена диагностика уровня экстраверсии с помощью опросника «Тест определения темперамента» (Г. Айзенк).

В результате психодиагностического исследования в группе выявлено 4 интроверта (2 выраженных, с уровнями экстраверсии 4 и 5 баллов, и 2 невыраженных, с уровнями экстраверсии 11 и 12 баллов) и 4 экстраверта (2 невыраженных, с уровнем экстраверсии 13 и 14 баллов, и 2 выраженных, с уровнем экстраверсии 16 баллов).

Для анализа динамики сердечного ритма была рассчитана динамика индекса вегетативного баланса [9] для каждого испытуемого, и затем получена средняя динамика для интровертов и экстравертов. Для этого в каждой динамике высчитаны средние значения индекса вегетативного баланса за каждые 10 % времени дискуссии, и далее высчитывались среднегрупповые значения за каждые 10 % времени дискуссии для экстравертов и интровертов.

Анализ результатов сердечного ритма показал, что у экстравертов индекс вегетативного баланса снижается в процессе социального взаимодействия. У интровертов наблюдается обратная динамика (рисунок). Это может быть связано с быстрой активизацией и захватыванием инициативы на себя в процессе общения экстравертами и более медленным включением в дискуссию интровертов. В процессе анализа были выявлены единичные стресс-активации, связанные с формулировкой и отстаиванием своей позиции в спорных моментах.



Средняя динамика индекса вегетативного баланса (ИВБ) в процессе социального взаимодействия у интровертов и экстравертов (коэффициент корреляции равен –0,56 по критерию Спирмена)

Из вышеописанного можно заключить, что ситуация социального взаимодействия индивида с аудиторией в условиях монолога является стрессовой в случае естественного публичного выступления. А в ситуации полилога на динамику вегетативного обеспечения процесса взаимодействия оказывают влияние индивидуальные особенности участника исследования, такие как уровень экстраверсии. Однако для подтверждения данного вывода требуется увеличение объема выборки испытуемых.

Литература

1. Вегетативные расстройства. Клиника, диагностика, лечение / под ред. А.М. Вейна. М., 2003.

2. *Кусраев Б.Н.* Коммуникативная рациональность Ю. Хабермаса : автореф. дис. … канд. филос. наук. М., 2002.

3. *Майерс Д.Д.* Социальная психология. СПб. : Питер, 2010. 800 с.

4. *Андреева Г.М.* Психология социального познания. 2-е изд. М. : Аспект Пресс, 2000. 288 с.

5. *Юрченко О.В.* Способы психологической саморегуляции функциональных состояний профессионала в процессе и реализации публичного выступления : дис. ... канд. психол. наук : 19.00.03 / ФБ ННГУ. М., 2007.

6. *Аргайл М.* Основные характеристики ситуации // Психология социальных ситуаций / сост. и общ. ред. Н.В. Гришиной. СПб. : Питер, 2001. С. 178–197.

7. *Полевая С.А.* Интегративные принципы кодирования и распознавания сенсорной информации. Особенности осознания световых и звуковых сигналов в стрессовой ситуации // Вестник Новосибир. гос. ун-та. 2008. Т. 2, вып. 2. С. 106-117.

8. *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 // Клинич. медицина. 2012. Вып. 4. С. 94–98.

9. *Баевский Р.М., Иванов Г.Г. и др.* Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 65–97.

10. *Бахчина А.В., Парин С.Б., Шишалов И.С., Кожевников В.В., Некрасова М.М., Котикова Д.С., Елизарьева Н.В., Полевая С.А.* Динамика ритма сердца в стрессогенных информационных контекстах // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях : тезисы докладов. Н. Новгород, 2013. С. 9–12.

11. *Вишнякова С.М.* Профессиональное образование : словарь : ключевые понятия, термины, актуальная лексика. М. : НМЦ СПО, 1999. 538 с.

«Овеществленное» сознание и восприятие музыки

М.Н. Корсакова-Крейн

Туро-колледж, Нью-Йорк, США

Введение

Понятие овеществленного сознания (*embodied cognition*) основано на признании того, что наши телесные реакции на окружающий мир влияют на наше сознание, что эмоции, память, речь и воображение неотделимы от непосредственных реакций нашего тела. Музыка, это сугубо абстрактное средство общения между людьми, представляет собой иллюстрацию телесного мышления двух уровней. Первый, тривиальный уровень, относится к влиянию обозреваемых движений тела на понимание музыки. Второй, глубинный уровень, имеет дело с мелодической морфологией. Наше сознание считывает информацию в музыке посредством сравнивания стабильных и нестабильных тональных элементов. Ощущение уровня стабильности напрямую связано с физическим ощущением уровня воспринимаемого напряжения, т. е. музыкальная морфология основана на крайне примитивном принципе восприятия, который задействует мышечные реакции. Мелодическое мышление являет собой, возможно, самый очевидный и целостный пример овеществленного сознания.

Речь и овеществленное сознание

Теория овеществленного сознания постулирует, что сенсорная информация и моторная деятельность существенны для познания мира и для развития способностей к абстрактному мышлению [1]. Поскольку память и понимание речи включают в себя сенсомоторные репрезентации, наше воображение опирается на уже испытанные жесты и движения [2]. Например, реакция на данное предложение происходит быстрее, если одновременно совершается физическое движение, описываемое этим предложением [3]. Прослушивание списка из глаголов и прилагательных во время томографии вызывает активизацию моторных зон мозга на глаголы, но не на прилагательные, что говорит об ассоциации речи с определенным мышечным опытом [4]. Восприятие абстрактных слов, таких как «смелость» и «достоинство», производит изменение активизации в зонах мозга, ассоциируемых с эмоциями [5]. Так как эмоции представляют собой аффективное состояние разума, сопровождающееся физиологическими изменениями, то можно предположить, что восприятие подобных слов тоже иллюстрирует овеществленное мышление.

Воспринимаемое напряжение и мелодическое мышление

Говоря об обычной музыке, мы имеем в виду мелодию и ритм. То есть два основных измерения музыкального искусства – это отношения между музыкальными звуками и стрела времени. Как правило, приложение теории овеществленного сознания к музыке имитирует подход к лингвистическому языку: подчеркивается присутствие видимых движений тела во время исполнения и прослушивания музыки и утверждается влияние этих движений на понимание содержания музыки [5]. Вид играющего музыканта действительно воздействует на восприятие музыки, но утверждение, что внешние телодвижения передают содержание музыки, не совсем верно, учитывая, например, то, что такие великие музыканты, как Святослав Рихтер и Глен Гульд, считали, что вид играющего пианиста отвлекает от слушания и понимания сути музыки.

Но есть неочевидные особенности мелодий и гармоний, которые позволяют назвать музыку особенно значимым образцом овеществленного сознания. Основанием для этого утверждения является природа мелодической морфологии, а именно разница в интуитивных мышечных реакциях слушателей на основные мелодические элементы, из которых состоит музыкальная материя.

Среди видов человеческого мышления и общения музыка стоит особняком, поскольку в ней отсутствует символическая репрезентация. Например, мы пользуемся общепринятыми символами в математике, чтобы передать математическое мышление, и мы пользуемся семантическими единицами-словами («константами сознания» [6]) в речи, чтобы сообщить о предметах, явлениях и их особенностях. В музыке нет ни слов, ни знакомых видимых образов, и в отличие от языка математики понимание музыки не требует специальной подготовки.

Музыкальные произведения способны вызывать эмоции и сообщать общие идеи, иначе говоря, музыка представляет собой абстрактный способ передачи сложной информации с целевым воздействием на человеческую психику. Это воздействие сопровождается изменением основных физиологических показателей [7–9], а также нейрохимическими изменениями [10]. Все вместе это говорит об участии автономной нервной системы в восприятии музыки.

Способ кодирования и передачи информации в музыке очень прост, и эта простота начинается с экономии основных строительных элементов (здесь мы говорим о европейской музыкальной традиции, доминирующей сегодня в мире).

Музыкальная материя состоит из семи диатонических и пяти хроматических тонов. Организация музыкальной материи циклична, так что эти 12 тонов повторяются в разных регистрах, развертываясь в музыкальный диапазон. Хотя 12 тонов отличаются по звуковысотности, главное в их отношениях – это разница в уровне притяжения к тональному центру (тонике), причем неустойчивые тона воспринимаются на слух как более напряженные.

Считывание рисунка информации в музыке происходит при помощи тональной системы отсчета, которая спонтанно выстраивается разумом, как только мы слышим музыкальные звуки. Эта схема восприятия обычно называется гаммой (рис. 1). Расстояние между тоникой и любым другим тоном гаммы представляет собой некий уровень тональной потенциальной энергии (уровень тонального притяжения). Музыка состоит из мелодических интервалов и их комбинаций. То, что тона и их сочетания отличаются по интенсивности тяготения к тональному центру, означает, что музыка как рисунок мелодической информации передает конфигурацию уровней притяжения. Характер отношений между тонами позволяет говорить о феноменальной гравитации [11] или тональном силовом поле.

Рис. 1. Градиент притяжения, образующий тональное силовое поле (иллюстрация для гаммы *до мажор*): вводный тон (диатоническая ступень VII) воспринимается как неустойчивый и тяготеющий к тонике, находящейся в яме тональной «потенциальной» энергии

Каждое музыкальное произведение существует в определенной тональности, т. е. в системе отсчета, построенной на определенном тональном центре. Расстояние между тональными центрами обычно иллюстрируют квинтовым кругом. Чем меньше общих тонов между двумя гаммами (т. е. чем меньше общей информации), тем больше тональное расстояние между двумя тональностями и тем дальше две тоники друг от друга на квинтовом круге (рис. 2).

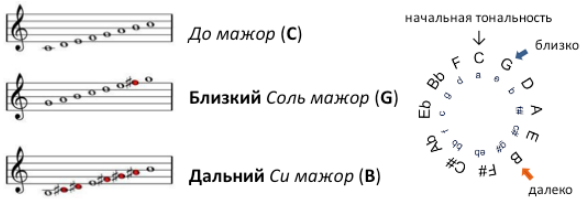


Рис. 2. Нотная запись и расположение гамм на квинтовом круге. Тональное расстояние нелинейно и возрастает по квинтам

Слова «тональное притяжение и разрешение» стандартное обозначение в практике обучения теории музыки в музыкальных школах всех уровней. Начиная с 80-х годов XX столетия появились эмпирические исследования реакций на воспринимаемое напряжение во время прослушивания музыкальных стимулов разной сложности: от отдельных звуков гаммы до отрывков из музыкальных произведений [12–15]. Результаты показали зависимость между воспринимаемым тональным напряжением и физическим напряжением. Те сочетания из музыкальных звуков, что звучат для слуха напряженно, называются диссонансами, а те, что звучат согласно, называются консонансами. Активизация мозга на консонанты отличается от активизации на диссонансы у однодневных младенцев [16], и звучание консонанса приятнее для двухмесячных детей, чем звучание диссонанса [17], т. е. человеческие существа рождаются способными воспринимать характер основных мелодических элементов. Более того, ощущение консонанса и диссонанса доступно только что вылупившимся цыплятам [18], что означает, что мелодическая материя музыки использует механизмы восприятия, не требующие когнитивных усилий высшего порядка.

Скорее всего, качество звучания сочетаний из музыкальных звуков объясняется градиентом затрат нейронной энергии на обработку акустической информации, где градиент затрат обусловлен общностью важной спектральной информации, а именно «родственностью по обертоновой линии». Например, приятные для слуха мажорное трезвучие и пифагоровы интервалы (октава, квинта и кварта) состоят из тонов, принадлежащих к самому началу данной обертоновой серии (учитывая октавную эквивалентность). На уровне нейронных сетей такое дублирование важной спектральной информации может создавать условия для более экономного процесса обработки акустической информации, другими словами, уровень благозвучия может зависеть от затрат нейронной энергии. Если это так, то психофизика мелодических элементов (комфортность звучания консонансов и напряженность звучания диссонансов) отражает взаимодействие физики звука и нейрофизиологии. Измерения нейронной активности посредством регистрации откликов ствола головного мозга на звуковые частоты (*brainstem frequency – following responses*) показали, что отклики были более сильными и когерентными в ответ на консонансные сочетания по сравнению с диссонансными [19]. Например, величина отклика распределилась следующим образом для трезвучий: мажорное > минорное > уменьшенное > увеличенное.

То, что комфортное для слуха мажорное трезвучие состоит из первых четырех обертонов любого естественного звука, указывает на важность «скрытого измерения обертонов». Именно взаимодействие обертоновых шлейфов является источником тонального силового поля, в котором мелодические структуры предстают «складками» тонального пространства (в том же смысле, как материальные объекты – это «складки и морщины» реального пространства [20]). Такой подход предлагает обсуждение музыки в терминах мелодической топологии.

Обычное музыкальное произведение включает устойчивые и неустойчивые тональные элементы. Природная интуиция направляет наше восприятие от тональной неустойчивости к устойчивости, что и создает ощущение музыкального движения. То, что тональная музыка воздействует на слушателя через звуковой рисунок, состоящий из уровней разной воспринимаемой устойчивости, означает также наличие соответствующего рисунка изменений мышечного напряжения.

Ощущение слухового согласия в консонансах по сравнению с напряженностью в диссонансах отражает главный морфологический принцип музыки – воспринимаемое тональное напряжение. Именно простота, если не примитивность, этого принципа и объясняет непосредственность воздействия музыки на слушателей разного возраста и разных когнитивных способностей, включая детей с аутизмом и пациентов с болезнью Альцгеймера. Музыка способна воссоздавать психологическое состояние посредством простейшего вида реакций живого организма на окружающую среду – физического напряжения.

Источник эмоций в музыке – тональные расстояния

Наше исследование восприятия переориентации системы отсчета в тональном поле показало, что ощущение тонких особенностей тональной организации не требует специальной музыкальной подготовки [21]. Этот вывод основывается на том, что результаты тестирования немузыкантов образовали карту тональных отношений, суть которой соответствует общепринятой теории функциональной гармонии (рис. 3).

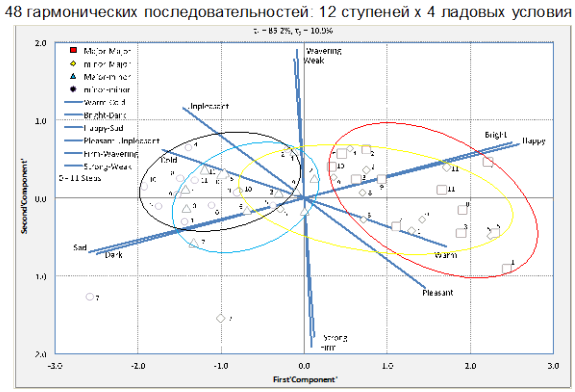


Рис. 3. Карта тональных расстояний в различных ладовых условиях. Модуляции на важные ступени 5 и 7 (субдоминанта и доминанта) были хорошо уловлены, так же как и популярные цели далеких переориентаций: ступени 8 и 1. Тритон (ступень 6), известный со Средних веков под именем «дьявол в музыке» (*diabolus in musica*), и пониженный вводный тон (ступень 10) были явно неприятны

Поскольку ощущения тональных расстояний измерялись с помощью биполярных шкал напряженно – расслабленно, тепло – холодно и ярко – темно, то можно говорить о том, что звучащая материя музыки воспринимается слушателями как через моментальные реакции мышечного напряжения, так и через квазисинестетические ощущения уровней тепла и яркости. Результаты показали, что дальнее тональное расстояние воспринималось как более напряженное, темное и холодное по сравнению с близкими расстояниями (рис. 4).

Тональные рисунки музыкальных произведений могут быть представлены как искусно составленная череда звуковых «запалов», вызывающих моментальные реакции напряжения и расслабления. Обычное понимание овеществленного сознания предполагает «проигрывание» предыдущего модально-специфичного опыта. В музыке идет воссоздание психологического состояния путем интеграции моментальных реакций, запрограммированных в тонах и ритме. Искусные последовательности музыкальных звуков и их сочетаний способны передавать не просто одну из четырех базовых эмоций, но сам *процесс переживания*: музыка воссоздает «логику эмоции» [22]. Причем в музыке мы часто имеем дело со сложной эстетической эмоцией, которая включает в себя чувство прекрасного, непрагматичный интерес, специфические культурные коды и личный опыт.

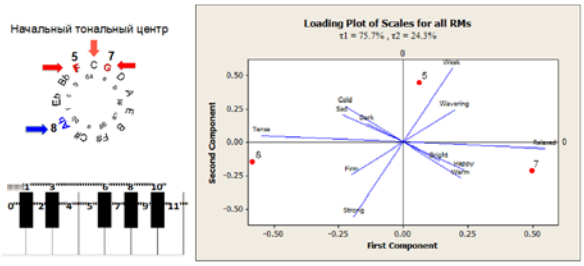


Рис. 4. Восприятие тональных расстояний: переориентация тонального центра на дальнее расстояние (ступень 8) ощущалась как более напряженная, темная и холодная, чем переориентация на близкие субдоминанту (5) и доминанту (7). Ступени пронумерованы для гаммы *до мажор*

Видимые движения и восприятие музыки: критика доминирующей идеологии

Существующие исследования овеществленного сознания в музыке сосредоточены на видимых движениях. Как правило, они упускают из виду основную причину, вызывающую эти движения и дающую им смысл: тональные отношения. Суть проблемы в том, что теория овеществленного сознания прилагается к музыке с точки зрения кинестетической информации, но без объяснения конкретных причин видимых движений. Например, обсуждение движений тела в ответ на фразировку в музыке без упоминания тональных отношений (источника мелодической фразировки) происходит из-за механического приравнивания лингвистического мышления к мелодическому мышлению. Но такое приравнивание не имеет под собой прочного основания, поскольку музыка не обладает когнитивными константами типа слов и поскольку мелодическое мышление, определяемое тональной гравитацией, находится ближе к пространственному мышлению, чем к речи.

Из повседневного опыта известно, что восприятие и понимание музыки может происходить без обозрения движений тела, и разнообразные виды аудиозаписи не оставляют в этом никаких сомнений. Различия в интерпретации того же самого произведения демонстрируют, что глубоко выразительное музыкальное исполнение может быть визуально предельно скупым.

Музыкальное исполнительство, конечно же, неразрывно связано с физическими усилиями и движениями. Виртуозная игра может доставить истинное наслаждение исполнителю, но это наслаждение неотделимо от точности передачи ме-

лодического образа и музыкальной формы, причем в музыке мелодическая мысль диктует движение. Причина движений в музыке – в передаче мелодического мышления, состоящего из распределенных вдоль стрелы времени тональных отношений. Симметричное исполнению, музыкальное восприятие представляет собой результат интеграции моментов тонального напряжения и расслабления, т. е. результат интеграции мышечной отзывчивости на тональные отношения и на детали ритма и метричность.

Видимые жесты и музыка

Есть особый случай, когда жестикуляция сама по себе, детально продуманная и технически виртуозная, важна для музыкальной практики. Речь идет об искусстве дирижирования, определяемом выразительностью и точностью жестов, цель которых помочь группе музыкантов в общем деле воссоздания образов и формы музыкального произведения. Движения дирижера учитывают специфику музыкальных инструментов и голоса и указывают на характер музыки в смысле динамики, фразировки и темповых и ритмических деталей, включая акцентировку и группировку. Все эти аспекты диктуются разворачивающимися во времени тональными отношениями, дающими жизнь мелодиям и гармониям.

Заключение

Учитывая, что наш «подкорковый анималистический мозг, с его базовыми функциями внимания, эмоций и мотивации, возможно, находится в центре нашей ментальной вселенной» и что понимание нейробиологии аффективных реакций «остается наиболее важным для понимания эволюции человеческого сознания» [23], исследование музыки, этого признанного языка эмоций, может оказаться существенно важным для понимания человеческого разума. Скромное число основных тональных элементов (семь диатонических тонов и пять хроматических) и простота основного принципа мелодической морфологии (воспринимаемое напряжение), а также очевидные пространственные характеристики тонального поля и музыкальных форм – все это позволяет надеяться на создание математической модели, объясняющей топологию мелодий. С учетом гипотезы супрамодальности в музыке [24] модель мелодической топологии может помочь пониманию абстрактного и пространственного мышления.

Литература

1. *Foglia L., Wilson, R.A.* Embodied cognition // WIREs Cogn. Sci. 2013. doi: 10.1002/wcs.1226.

2. *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.

3. *Glenberg A.M., Kaschak M.P.* Grounding language in action // Psychon. Bull. Rev. 2002. V. 9. P. 558–565.

4. *James K.H., Maouene J.* Auditory verb perception recruits motor systems in the developing brain: an fMRI investigation // Dev. Sci. 2009. V. 12. F26–F34.

5. *Leman M., Maes P.-J.* The Role of Embodiment in the Perception of Music // Empirical Musicology Review. 2014. V. 9. P. 3–4.

6. *Солнцев В.М.* К вопросу о семантике, или языковом значении : (вместо предисловия) // Проблемы семантики, М. : Наука, 1974.

7. *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.

8. *Grewe O., Nagel F., Kopiez R., Altenmüller E.* Listening to music as a re-creative process – physiological, psychological and psychoacoustical correlates of chills and strong emotions // Music Perception. 2007. V. 24, № 3. P. 297–314.

9. *Guhn M., Hamm A., Zentner M.* Physiological and musico-acoustic correlates of the chill response // Music Perception. 2007. V. 24, № 5. P. 473–484.

10. *Chanda M.L., Levitin D.J.* The neurochemistry of music // Trends in Cognitive Sciences. 2013. V. 17, № 4. P. 179–193.

11. *Scruton R.* The Aesthetics of Music. Oxford University Press, 1997.

12. *Krumhansl C.L., Kessler E.* Tracing the dynamic changes in perceived tonal organization in a spatial representation of musical keys // Psychological Review. 1982. V. 89. P. 334–368.

13. *Bigand E., Parncutt R., Lerdahl F.* Perception of musical tension in short chord sequences: The influence of harmonic function, sensory dissonance, horizontal motion, and musical training // Perception and Psychophysics. 1996. V. 58. P. 125–141.

14. *Krumhansl C. L.* A perceptual analysis of Mozart's piano sonata K. 282: Segmentation, tension, and musical ideas // Music Perception. 1996. V. 13. P. 401–432.

15. *Madsen C.K., Fredrickson W.E.* The experience of musical tension: A replication of Nielsen's research using the continuous response digital interface // J. Music Therapy. 1993. V. 30. P. 46–63.

16. *Virtala P., Huotilainen M., Partanen E., Fellman V., Tervaniemi M.* Newborn infants' auditory system is sensitive to Western music chord categories // Front Psychol. 2013.V. 4. P. 492. doi: 10.3389/fpsyg. 2013.00492.

17. *Trainor L.J.* Are there critical periods for music development? // Developmental Psychobiology. 2004. V. 46. P. 262–278.

18. *Chiandetti C., Vallortigara G.* Chicks like consonant music // Psychological science. 2011. V. 22, № 10. P. 1270–1273.

19. *Bidelman G.M., Krishnan A.* Neural correlates of consonance, dissonance, and the hierarchy of musical pitch in the human brainstem // J. Neuroscience. 2009. V. 29, № 42. P. 13165–13171.

20. *Флоренский П. А.* Анализ пространственности и времени в художественно-изобразительных произведениях. М. : Прогресс, 1993.

21. *Korsakova-Kreyn M., Dowling W.J.* Emotional processing in music: Study in affective responses to tonal modulation in controlled harmonic progressions and real music // Psychomusicology. 2014. V. 24, № 1. P. 4–20.

22. *Langer S.* Philosophy in a New Key: A Study in the Symbolism of Reason, Rite and Art. Harvard University Press, 1942; 1957.

23. *Panksepp J.* Affective consciousness and the origins of human mind: A critical role of brain research on animal emotions, the triune mind // Impulse. 2004. V. 57. P. 47–60.

24. *Korsakova-Kreyn M., Dowling W.J.* Mental Rotation in Visual and Musical Space: Comparing Pattern Recognition in Different Modalities [under revision]. URL: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0CDMQFjADahUKEwiYsIeBgvHGAhVDFywKHRb1DZg&url=http%3A%2F%2Fldg.klitzner.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2013%2F12%2FMental-Rotation-Marina-Korsakova-Kreyn.doc&ei=EL6wVZjoCMOusAGW6rfACQ&usg=AFQjCNHUHYSn6hNGX5QDc4AXY-S2xs5qEw&bvm=bv.98476267,d.bGg.

Моделирование динамики научения при формировании и реорганизации навыка

А.К. Крылов

Институт психологии РАН, Москва

В настоящей работе предлагается математическая модель формирования и реорганизации навыка при научении, анализируются кривые научения в этих процессах, полученные в компьютерной модели, и сопоставляются с данными, полученными при научении у животных [1]. Делаются выводы о возможных системных механизмах формирования и реорганизации навыка.

Любой навык служит достижению определенной цели и может успешно реализоваться в определенных условиях. Когда исчезает возможность достижения цели прежним способом, формируется новый навык. Формирование нового навыка с точки зрения системно-эволюционной теории происходит путем образования новой функциональной системы (ФС) достижения этого результата, при этом происходит специализация нейронов относительно этой ФС [4]. Когда навык уже сформирован и изменяются лишь внешние обстоятельства его реализации, происходит реорганизация навыка, чтобы его можно было применять в новых обстоятельствах [2]. При этом происходят не такие значительные адаптации нейронного обеспечения, как при формировании нового навыка. Таким образом, можно рассмотреть два процесса в научении:

- формирование навыка,
- реорганизацию навыка.

Динамика научения в этих двух процессах может качественно отличаться. В частности, замечено (см. ниже), что реорганизация навыка происходит существенно быстрее, чем его формирование. При этом оба процесса демонстрируют S-образные кривые научения при стандартном методе их отображения.

Далее представлены результаты, полученные сотрудниками лаборатории психофизиологии Института психологии РАН К.Р. Арутюновой и др. в экспериментах по изучению динамики научения животных [1]. Затем для описания этих данных нами предлагается математическая модель научения.

Методика обучения животных

Исследование обучения инструментальному пищедобывательному поведению проведено на 47 крысах линии Long Evans [1]. Исследование проводилось в экспериментальной клетке, по углам которой симметрично располагались две педали и две автоматически подающиеся кормушки. При нажатии на эффективную педаль порция пищи (кубик сыра) подавалась в соответствующую данной педали кормушку. Эффективной могла быть только одна педаль. Смена эффективной педали производилась экспериментатором. Животные имели возможность научиться нажимать на педаль для получения пищи в кормушке. Каждая сессия занимала 30 мин. Критерием научения служило регулярное циклическое поведение нажатия на педаль и получения пищи в кормушке. Объективным показателем научения служило число нажатий на эффективную педаль с последующими подходами к кормушке. Считали, что животное научилось, когда это число превышало 30 в одну сессию обучения и поведение становилось цикличным: нажатие на педаль – пробежка к кормушке – залезание в кормушку и захват пищи – пробежка к педали и т.д. После того как методом проб и ошибок крысы научались инструментальному пищедобывательному поведению на одной педали, экспериментатор менял эффективную педаль и животное училось на второй стороне. Таким образом, обучение на первой стороне представляло собой формирование нового навыка, а последующее обучение на второй стороне представляло собой реорганизацию сформированного навыка.

Результаты обучения животных

Для обучения на первой педали животным потребовалось от 4 до 14 тридцатиминутных сессий. Динамика научения не была плавным нарастанием эффективности поведения от сессии к сессии: в первые сессии животные редко совершали эффективное поведение, а затем происходил резкий скачок эффективности, как правило, в рамках одной сессии, и наступало это формирование навыка в 4–14-ю сессии.

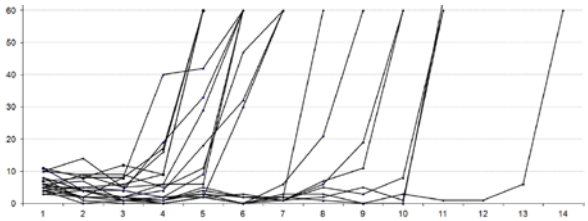


Рис. 1. Кривые научения при формировании навыка у 17 животных. По горизонтали – номер экспериментальной сессии. По вертикали – количество успешных действий в сессию. Величины более 60 означают успешное завершение научения. Виден S-образный характер кривых научения, с резким ростом успешности в одну сессию

Обучение на второй стороне было значительно динамичнее. После некоторого количества неуспешных попыток нажатия на неэффективную педаль животные совершали пробежки по периметру клетки и довольно быстро находили вторую педаль, которая становилась эффективной и приносила пищу в другой кормушке. При этом, несмотря на быстрое обнаружение эффективности

второй педали, животные часто возвращались к первой педали и совершали по нескольку проб на неэффективной стороне. Обучение на второй стороне потребовало от 1 до 4 сессий. В среднем, обучение на второй стороне происходило в 6 раз быстрее, чем формирование навыка на первой стороне. Все животные обучались поведению на второй педали быстрее, чем на первой, продемонстрировав «перенос» навыка (подробнее о явлении «переноса» навыка см., например, в [3]).

Модель формирования навыка

Формирование нового навыка происходит путем формирования новой ФС и ее дальнейшей актуализации в данных обстоятельствах. Обозначим вероятность актуализации P. После каждой успешной реализации навыка эта вероятность увеличивается и постепенно, по мере успешных проб, приближается к 1:

$$dP(t)/dt = 1 - P(t). \qquad (1)$$

Численный расчет проводился по формуле

$$P(t + 1) = P(t) + \tau\,(1 - P(t)). \qquad (2)$$

Здесь t – время (номер пробы), τ – коэффициент скорости обучения. Такое изменение вероятности актуализации P применялось только после успешных проб. Успешность очередной пробы определялась случайной величиной $\xi(t)$, равномерно распределенной от 0 до 1, разыгрываемой на каждом такте t. Если она оказывалась меньше $P(t)$, то проба считалась успешной. Начальное значение $P(0)$ принималось 0,05.

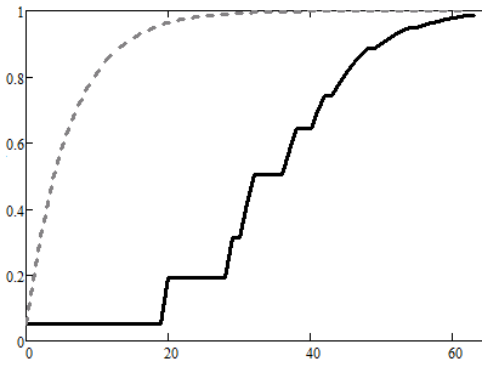


Рис. 2. Пример графика $P(t)$ в модели (сплошная линия). Соответствует стандартной отрисовке кривой научения и имеет S-образный вид. Пунктиром показана эта же кривая, построенная только в моменты успешных проб, имеет логарифмический вид. По горизонтали – номер пробы, по вертикали – значение $P(t)$

Формулы (1), (2) предполагают логарифмический характер роста величины P. Однако, ввиду того что P менялось по формуле (2) не в каждый такт t, а только при успешных реализациях, т.е. когда $\xi(t) < P(t)$, кривая научения в модели получилась близка к S-образной (сплошная линия на рис. 2). Если же эту кривую строить не по всем тактам t работы модели, а только по успешным пробам, то форма кривой меняется и она становится логарифмической (пунктирная линия на рис. 2). Это означает, что форма кривой научения при внутренне одинаковом механизме может оказаться внешне различной, в зависимости от того, как экспериментатор строит кривую научения – по всем пробам или только по успешным.

Далее по этой модели было проведено 34 испытания для сопоставления полученных кривых научения (рис. 3) с кривыми научения при формировании навыка на 34 животных (ср. рис. 1). Общий характер кривых – S-образный.

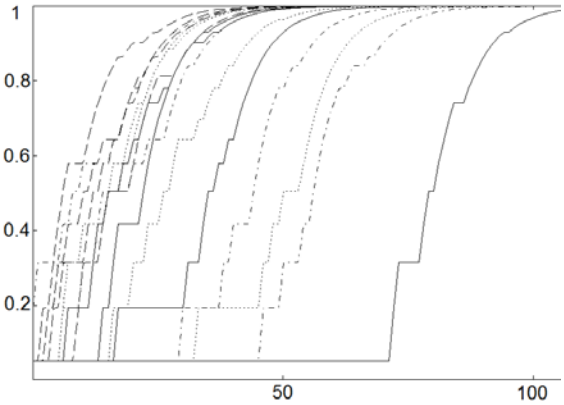


Рис. 3. Кривые научения в модели. 34 испытания. По горизонтали – номер пробы. По вертикали – значения вероятности успешности пробы $P(t)$

В эксперименте на животных обучение считалось завершенным, когда в течение сессии животное совершало не менее 30 успешных проб (поэтому верхняя часть графиков на рис. 1 не показана). В модели мы считали обучение завершенным, когда вероятность актуализации нового навыка P становилась выше 0,9. Моменты времени t, в которые для каждого испытания $P(t)$ превысило эту величину, были занесены в таблицу. Эти времена представляют собой длительность обучения в модели. По 34 испытаниям в модели были получены такие оценки длительности обучения и сопоставлены с длительностями обучения у 34 животных. Для этого они, отдельно для модели и для животных, были отсортированы по возрастанию, а также приведены к единому масштабу путем деления на среднее значение (рис. 4).

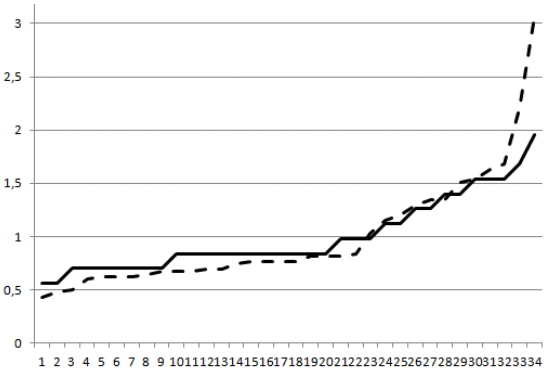


Рис. 4. Сопоставление длительностей формирования навыка у животных (сплошная линия) и в модели (пунктир). Показаны данные по 34 животным и 34 испытания модели. Длительности отсортированы по возрастанию и приведены к единому безразмерному временному масштабу по вертикали путем деления каждой величины на среднее в наборе

Сходство кривых на рис. 4 означает, что разброс скоростей обучения у животных может удовлетворительно описываться предложенной моделью. А поскольку в модели это 34 испытания при одних и тех же параметрах и различия между результатами испытаний носят исключительно случайный характер, следовательно различия между скоростью обучения животных могли также иметь случайный характер и не являться выражением особенностей их индивидуального опыта. Для проверки этой гипотезы можно провести другой эксперимент по обучению этой же группы животных и замерять их скорости обучения другому навыку. Если корреляции между скоростями обучения разным навыкам не будет, то гипотеза о роли случайных факторов подтвердится. Если же будет обнаружена корреляция между скоростями обучения разным навыкам, это будет означать влияние на скорость обучения индивидуальных различий между животными, а не случайных факторов.

Модель формирования и переноса навыка

При решении первой задачи часть формирующегося опыта будет затем использоваться животным и в следующей задаче [2, 3]. Обозначим вероятность актуализации этой части опыта, которая используется при решении обеих задач, P_0. Обозначим P_1 вероятность актуализации другой части индивидуального опыта, более специфической, которая будет использоваться только в одной задаче (на одной стороне клетки). Обозначим Q актуализацию прочих навыков, не пригодных для решения текущей задачи. Тогда успешное выполнение поведенческого цикла происходит при совместной актуализации P_0 и P_1, и не актуализации Q. Поэтому вероятность успешного решения задачи в текущую пробу равна $(1 - Q(t))P_1(t)P_0(t)$.

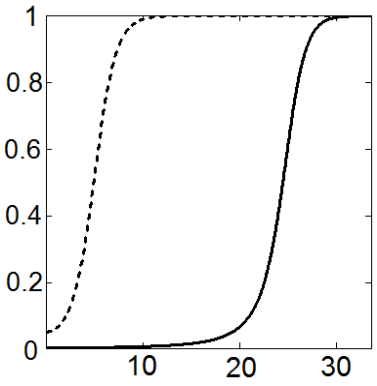


Рис. 5. Кривые обучения в модели при формировании навыка (сплошная линия) и его реорганизации (пунктир). По горизонтали – время (такты модели). По вертикали – вероятность успешного совершения поведенческого цикла

Модель формировании навыка:

$$dP_1(t) / dt = (1 - P_1(t)) (1 - Q(t)) P_1(t) P_0(t), \quad (3)$$

$$dP_0(t) / dt = (1 - P_0(t)) (1 - Q(t)) P_1(t) P_0(t), \quad (4)$$

$$dQ(t) / dt = 0{,}5 (0 - Q(t)) (1 - P_1(t) P_0(t)). \quad (5)$$

Здесь P_1 – вероятность актуализации навыка на одной, определенной, стороне, P_0 – вероятность актуализации навыка на любой стороне клетки, Q – вероятность актуализации прочих навыков. Начальные условия при формировании навыка: P_1 и P_0 близки к нулю, Q близко к 1. Кривую обучения при формировании навыка в модели см. на рис. 5 (сплошная линия).

Перенос навыка можно описать той же моделью с другими начальными значениями. Поскольку общая часть опыта уже сформирована при решении задачи на первой стороне клетки, она на второй стороне подвергается незначительной реорганизации, поэтому считаем P_0 близко к 1, и остается только освоить специфичную для второй стороны клетки часть опыта, вероятность актуализации которой обозначим P_2 (аналог P_1):

$$dP_2(t) / dt = (1 - P_2(t)) (1 - Q(t)) P_2(t) P_0(t), \quad (6)$$

$$dQ(t) / dt = 0{,}5 (0 - Q(t)) (1 - P_2(t) P_0(t)). \quad (7)$$

Начальные значения: P_2 близко к нулю, P_0 и Q близки к 1. Кривая обучения при переносе показана на рис. 5 пунктиром. Видно, что скорость обучения в модели при переносе ранее сформированного опыта на решение новой задачи выросла примерно в 3 раза.

Таким образом, в предложенной нами модели получены S-образные кривые научения при формировании и реорганизации (переносе) навыка, причем обучение при переносе происходит значительно быстрее, что соответствует данным, полученным на животных.

Работа сделана при поддержке гранта РГНФ №14-06-00155а.

Литература

1. *Арутюнова К.Р., Гаврилов В.В., Александров Ю.И.* Научение и поведение в отсутствие зрительного контакта со средой у крыс // Экспериментальная психология. 2014. Т. 7, № 3. С. 31–43.

2. *Александров Ю.И.* Закономерности актуализации индивидуального опыта и реорганизации его системной структуры: комплексное исследование // Труды ИСА РАН. 2011. Т. 61, вып. 3. С. 3–25.

3. *Созинов А.А., Крылов А.К., Александров Ю.И.* Эффект интерференции в изучении психологических структур // Экспериментальная психология. 2013. № 1. С. 5–47.

4. *Швырков В.Б.* Введение в объективную психологию : нейрональные основы психики / под ред. Ю.И. Александрова. М. : Институт психологии РАН, 1995.

Применение нового метода, основанного на колмогоровской сложности, к анализу биологических «текстов» на примере охотничьих стереотипов мелких млекопитающих

Я.В. Левенец[1], С.Н. Пантелеева[1,2], Ж.И. Резникова[1,2], Б.Я. Рябко[3]

[1]Институт систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск
[2]Новосибирский государственный университет
[3]Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

Введение

Задача анализа символьных последовательностей возникает во многих областях науки, включая молекулярную биологию, генетику, лингвистику, зоосемиотику, этологию, а также медицину и фармакологию, когда возникает необходимость диагностики по различиям в поведенческих последовательностях. Одна из важных проблем в изучении поведения животных – это поиск надежного критерия для оценки изменчивости и сложности поведенческих последовательностей. В эволюционной биологии изменчивость известна как важный механизм видообразования у животных, и различия во врожденных поведенческих стереотипах имеют высокую диагностическую ценность для идентификации видов. Для исследования эволюционной преемственности поведения важно выделять не только ключевые элементы и их совпадение в стереотипах разных видов, но и степень их связности. Мы предлагаем в качестве инструмента для количественного описания стереотипов оценку сложности поведенческих последовательностей, основанную на применении идей, связанных с понятием колмогоровской сложности [1]. Применение идей теории информации в биологии до сих пор ограничивалось исследованием процессов коммуникации [9, 11]. Метод, связывающий идеи колмогоровской сложности и математической статистики, имеющий универсальное применение, был разработан лишь недавно [10]. Появление нового метода было вызвано тем, что исследователи часто сталкиваются с необходимостью оценить характеристики текста на основе небольшого числа параметров. Один из наиболее популярных подходов заключается в применении различных методов описания последовательностей на основе стохастических процессов, в частности, с применением марковских цепей (обзор см. [6]). Однако эти методы не дают возможности тестирования гипотез с помощью математической статистики, тогда как новый метод сочетает идеи колмогоровской сложности [1] и классический фишеровский подход к тестированию гипотез [5], составляющий основу количественной оценки биологических данных. Теоретическое обоснование этого метода дано в работе Б.Я. Рябко и соавторов [10].

Задачей данной работы было продемонстрировать релевантность нового метода сравнения биологических «текстов» на примере охотничьего поведения мелких млекопитающих и оценить перспективы его применения для изучения эволюционной преемственности поведенческих стереотипов.

Мы используем этограммы (запись поведенческих актов в виде букв некоего алфавита) как пример биологического «текста». В нашем случае алфавит – это весь набор элементарных поведенческих актов, характерный для изучаемых животных, а последовательность букв – демонстрируемое поведение. Элементы поведения – это элементарные двигательные акты и позы [13]. Внутри поведенческих последовательностей мы выделяем поведенческие стереотипы, состоящие из устойчиво повторяющихся элементов поведения [4, 8]. Мы используем приближение к оценке колмогоровской сложности, которое получают с помощью алгоритмов сжатия данных.

Материалы и методы

Сущность метода заключается в статистической проверке гипотезы H_0 (последовательности порождаются одним источником), против гипотезы H_1 (последовательности порождаются разными источниками). Практически это можно сделать следующим образом: 1) из последовательностей, которые нужно сравнить, выбираются фрагменты $(x_1, ..., x_t)$ одинаковой длины t так, чтобы к получившимся выборкам можно было применить критерий Манна – Уитни (в каждой из выборок должно быть не менее 3 значений признака, в выборочных данных не должно быть совпадающих значений или таких совпадений должно быть очень мало); 2) сложность каждого фрагмента определяется как $K(x_1, ..., x_t) = |\phi(x_1, ..., x_t)| / t$, где ϕ – архиватор, а $|\phi(x_1, ..., x_t)|$ – длина сжатого архиватором фрагмента последовательности; 3) с помощью критерия Манна – Уитни проверяется гипотеза H_0 (между уровнем сложности в рассматриваемых выборках нет существенного различия), против гипотезы H_1 (уровень сложности в рассматриваемых выборках существенно различается).

Для сопоставления охотничьих стереотипов мелких млекопитающих по отношению к подвижным насекомым были выбраны специализированный хищник (обыкновенная бурозубка), эврифаг с хорошо изученным и широко распространенным в популяциях охотничьим поведением (серая крыса) и полевая мышь – зерноядный грызун, который, как выяснилось совсем недавно, обладает факуль-

тативным, но ярко выраженным охотничьим поведением [3]. Исследования проводились в 2012–2014 гг. в лабораторных условиях на беспородной серой крысе *Rattus norvegicus* (Berkenhout, 1769) (n = 81), полевой мыши *Apodemus agrarius* (Pallas, 1771) (n = 26) и обыкновенной бурозубке *Sorex araneus* (Linnaeus, 1758) (n = 11).

Для наблюдения за процессом охоты животных по одному помещали в прозрачную пластиковую арену 45 × 45 × 50 см для серых крыс и 30×30×35 см для остальных видов, передерживали в ней в течение 5 мин, после чего им предъявляли добычу (бросали в арену сверху) и начинали фиксировать поведение с помощью видеокамеры. В качестве подвижной добычи предъявляли имаго мраморного таракана *Nauphoeta cinerea* (Olivier, 1789), средняя длина тела (27,93 ± 0,22) мм (n = 30). Тем особям, которые демонстрировали охотничье поведение в первом же тесте, последовательно предъявляли 3 единицы добычи. Наблюдения длились до завершения поедания добычи, либо, если животное не проявляло интерес к добыче, наблюдения прекращались через 10 мин. Серые крысы тестировались один раз, полевые мыши и обыкновенные бурозубки два раза. Для анализа отбирались только случаи успешной (полной, закончившейся поеданием добычи) охоты.

Обработка видеозаписей проводилась посекундно при помощи программы The Observer XT 10.0 (Noldus Information Technology). Всего было выделено 19 элементов охотничьего поведения, которые мы разделили на 3 группы. Первая – ключевые элементы, без которых выполнение стереотипа невозможно (например, укус, захват добычи передними лапами, преследование добычи шагом или рысью). Вторая – дополнительные элементы: «приготовления» к охоте и поеданию добычи – присутствовали не во всех стереотипах (перехват добычи лапами, принюхивание, перенос добычи в зубах, откусывание конечностей добычи, придерживание добычи одной или двумя лапами). Третья – шумовые элементы, не влияющие на выполнение стереотипа (чистка, движение назад, прыжок и др.).

Каждый элемент обозначался латинской буквой. Используя полученный «алфавит», мы преобразовали отснятый видеоматериал в символьные последовательности. Завершенные (полные), закончившиеся поимкой и поеданием добычи поведенческие последовательности были объединены и перенесены через пробел в отдельные текстовые файлы (с расширением .txt). Получено 3 «суммарных» текстовых файла, каждый из которых содержал завершенные охотничьи стереотипы отдельно для каждого исследованного вида. При помощи написанной нами программы были сформированы текстовые файлы, содержащие поведенческие стереотипы, выбранные случайным образом из «суммарных» файлов. Получено по пять файлов для каждого вида размером 100, 200 и 300 байт. Файлы формировались таким образом, что вырезанные целые стереотипы не дублировались, т.е. каждый случайный файл содержал новые, не перекрывающие друг друга последовательности.

Текстовые файлы сжимались при помощи архиватора, после чего проводилась сравнительная оценка степеней сжатия полных охотничьих стереотипов. Под степенью сжатия понимается отношение размера заархивированного файла к его исходному размеру. Степень сжатия тем меньше, чем лучше сжимается файл, и наоборот, чем хуже сжимается файл, тем степень сжатия больше. Различия в степени сжатия файлов отражают различия в сложности записанных в них поведенческих последовательностей. Реализуемая в программах-архиваторах возможность сжатия информации тесно связанна с методом сжатия, т. е. алгоритмом, находящим закономерности в архивируемом файле. Чем больше закономерностей способен обнаружить и закодировать метод сжатия, реализуемый в архиваторе, тем меньше степень сжатия и тем меньшей сложностью обладает записанный в архивируемый файл «текст». Различные методы сжатия имеют специфические особенности – так, одни лучше сжимают видеофайлы, другие изображения, третьи текст. Это обусловлено различными алгоритмами сжатия данных, лежащими в их основе, при этом чем больше закономерностей позволяет обнаружить и сжать алгоритм, тем мощнее метод сжатия.

При сжатии данных для корректной работы программы-архиватора необходим определенный объем данных, записанных в архивируемом файле. В случае слишком малого объема информации и высокого разнообразия кодируемых элементов («словаря») в архивируемом файле программа-архиватор не сможет обнаружить какие-либо закономерности. Степень сжатия такого файла будет равна нулю, а добавленные в архив вспомогательные данные программы-архиватора могут увеличить объем архива, что приведет к тому, что объем архива будет больше, чем архивируемый файл. Исходя из этих требований, были выбраны архиватор с открытым исходным кодом 7-zip, формат архива .bz2 и метод сжатия Bzip2, позволяющие наиболее эффективно сжимать полученные нами символьные последовательности определенной длины, записанные в текстовые файлы.

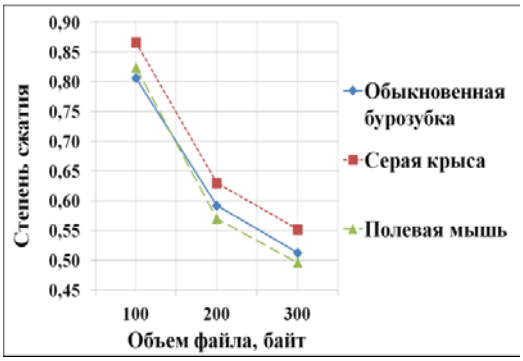
Следует отметить, что предложенный подход к анализу сложности «биологических текстов» с использованием программ-архиваторов в случае невысокой мощности метода сжатия обнаруживает только реализуемые в алгоритме сжатия закономерности. Эта особенность алгоритмов сжатия данных позволяет избежать возникновения артефактов и «ложноположительных» данных. Если использовать «плохой» архиватор, то можно не увидеть реальных различий, но «ложных» различий не появится; т.е. будет приниматься H_0 вместо H_1, но не наоборот.

Результаты

Охотничье поведение в экспериментах продемонстрировали 67,9 % особей серой крысы, 65,38 % полевой мыши и 100 % обыкновенной

бурозубки. Всего зафиксировано 125 последовательностей полных (закончившихся поимкой и поеданием добычи) охотничьих стереотипов серых крыс, 83 – полевых мышей и 76 – обыкновенных бурозубок, а объем суммарных файлов составил 2867, 3343, 1637 байт соответственно. Полные охотничьи стереотипы полевых мышей обладали большей длиной (в среднем 39,39 ± 3,18 элементов поведения), чем у серых крыс (в среднем 21,94 ± ± 1,65 элементов поведения) и обыкновенных бурозубок (в среднем 25,9 ± 2,42 элементов поведения) (t = 5,302, p < 0,01; t = 3,183, p < 0,01).

Полные охотничьи стереотипы серых крыс при объеме файлов 200 и 300 байт обладали наибольшей сложностью по сравнению со стереотипами других исследованных видов (критерий Манна – Уитни $U_{эмп}$ = 0, $U_{кр}$ = 1, p < 0,01) (см. рисунок). Степени сжатия файлов объемом 100 байт достоверно не различались. Это связано с упомянутым выше влиянием метода сжатия и информацией, записанной в архивируемом файле. В нашем случае на файлы, содержащие стереотипы серых крыс объемом 100 байт, приходилось в среднем 4,8, а у полевых мышей 2,4 полных охотничьих стереотипа. При объеме файлов 200 байт файлы со стереотипами крыс содержали в среднем 8,4, а полевых мышей 5,8 стереотипа. Поскольку стереотип представляет собой устойчиво повторяющиеся последовательности элементов, для обнаружения этих закономерностей требуется определенное количество стереотипов. При слишком малом числе стереотипов обнаруженных архиватором закономерностей недостаточно для отражения полной картины стереотипа. Поэтому для корректного отражения различий требуется 5 или более различных стереотипов.



Зависимость степени сжатия от объема файла

В поисках ответа на вопрос о возможных причинах различий в сложности охотничьего стереотипа грызунов и обыкновенной бурозубки произведен расчет значений корреляции Пирсона для степени сжатия и различных параметров охотничьего поведения. Количество элементов поведения и доля ключевых элементов поведения (таких как одиночные и двойные укусы) отрицательно коррелировали со степенью сжатия. Это означает, что данные параметры охотничьего поведения уменьшают сложность стереотипа, тогда как количество стереотипов в исходном файле, а также доли дополнительных и шумовых элементов поведения увеличивают степень сжатия файла, т. е. увеличивают сложность стереотипа.

Значения корреляции Пирсона (r) для степени сжатия и различных параметров охотничьего поведения

	Объем файла		
	100 байт	200 байт	300 байт
Количество стереотипов	0,254	0,336	0,513
Количество элементов поведения	0,382	–0,336	–0,499
Доля элемента поведения «Укус» (*W*)	–0,633*	–0,829**	–0,762**
Доля «двойных» укусов (*WW*)	–0,668**	–0,799**	–0,751**
Доля ключевых элементов поведения	–0,46	–0,828**	–0,702**
Доля дополнительных элементов поведения	0,035	0,758**	0,682**
Доля шумовых элементов поведения	0,665**	0,629*	0,513

Примечание: Обозначены достоверные значения: * p < 0,05; ** p < 0,01.

Можно полагать, что высокая сложность охотничьих стереотипов серых крыс обусловлена меньшей в сравнении с полевыми мышами и обыкновенными бурозубками долей ключевых элементов в стереотипе, а также малой длиной стереотипа и высокой долей шумовых элементов поведения. Сходная сложность охотничьих стереотипов полевых мышей и обыкновенных бурозубок вызвана преобладанием в стереотипе ключевых элементов поведения, малым количеством шумовых элементов поведения и большей длиной стереотипа.

Обсуждение и заключение

Таким образом, применение нового подхода позволило сравнить сложность охотничьих стереотипов трех видов мелких млекопитающих. Стереотипы охоты на насекомых оказались сходными по своей лаконичности и невысокой сложности у полевой мыши и у специализированного насекомоядного вида (обыкновенной бурозубки). У серой крысы охотничье поведение более лабильно, менее лаконично и обладает наибольшей сложностью среди сравниваемых видов. Высокая сложность поведения серой крысы ожидаема, поскольку изменчивость поведения у этого вида хорошо известна [14]. Близость охотничьего стереотипа полевой мыши к стереотипу специализированного хищника представляется нам очень интересной. Среди хомяковых грызунов известны немногочисленные специализированные охотники на насекомых [7], однако, насколько нам известно, среди мышевидных грызунов специализированные охотники до сих пор не отмечались. Полевая мышь до сих пор была известна как зерноядный грызун, хотя и с широким пищевым спектром, включающим беспозвоночных [2]. «Высокопрофессиональные» качества этого вида как охотника, да еще и в условиях охоты на опасную добычу, выяснились совсем недавно [12].

Полученные нами количественные данные делают актуальным изучение эволюционной преемственности охотничьих стереотипов у грызунов с расширением спектра исследуемых видов, а новый метод сравнения поведения на основе идей колмогоровской сложности позволяет оперативный и нетрудоемкий анализ поведенческих последовательностей.

Предлагаемый метод применим для сравнения поведения в любых, в том числе и когнитивных, экспериментах, результаты которых возможно представить в виде биологических текстов. Метод позволяет находить неочевидные закономерности, влияющие на сложность поведенческих последовательностей, и на их основе переходить к поиску возможных объяснений сходства и различия поведения. Существенное преимущество данного метода, основанного на идеях колмогоровской сложности, заключается в оценке связанности элементов в поведенческих последовательностях при сравнительно малых объемах данных, которые при применении популярных до сих пор методов анализа поведения на основе стохастических процессов не позволяют произвести статистическую оценку значимости.

Литература

1. *Колмогоров А.Н.* Три подхода к определению количества информации // Проблемы передачи информации. 1965. Т. 1, № 1. С. 3–11.

2. *Окулова Н.М., Антонец Н.В.* Сравнительная характеристика экологии мышей рода *Apodemus* (Rodentia, Muridae) Днепровско-Орельского заповедника // Поволжский экологический журнал. 2002. № 2. С. 108–128.

3. *Пантелеева С.Н., Выгоняйлова О.Б., Резникова Ж.И.* Рыжие лесные муравьи как потенциальная массовая добыча полевых мышей: результаты лабораторных экспериментов // Евразиатский энтомологический журнал. 2011. Т. 10, № 1. С. 99–103.

4. *Пантелеева С.Н., Данзанов Ж.А., Резникова Ж.И.* Оценка сложности поведенческих стереотипову муравьев на примере анализа охотничьего поведения *Myrmica rubra* (Hymenoptera, Formi-cidae) // Зоологический журнал. 2010. Т. 89, № 12. С. 500–509.

5. *Fisher R.A.* Statistical Methods, Experimental Design, and Scientific Inference. Edinburgh : Oliver & Boyd, 1956. P. 175.

6. *Kershenbaum A. et al.* Acoustic sequences in non-human animals: a tutorial review and prospectus [Электронный ресурс]. URL: http://onlinelibrary.wiley.com/doi: 10.1111/brv.12160/full.

7. *Landry S.O.* The rodentia as omnivores // Quarterly Review of Biology. 1970. Vol. 45. P. 351–372.

8. *Reznikova Zh., Panteleeva S., Danzanov Zh.* A new method for evaluating the complexity of animal behavioral patterns based on the notion of Kolmogorov complexity, with ants' hunting behavior as an example // Neurocomputing. 2012. Vol. 84. P. 58–64. DOI: 10.1016/ j.neucom.2011.12.019.

9. *Ryabko B., Reznikova Zh.* The use of ideas of information theory for studying “language” and intelligence in ants // Entropy. 2009. Vol. 11. P. 836–853.

10. *Ryabko B., Reznikova Zh., Druzyaka A., Panteleeva S.* Using Kolmogorov complexity for studying biological texts // Theory of Computing Systems. 2013. Vol. 52. № 1. P. 1–17. DOI: 10.1007/s00224-012-9403-6.

11. *Ryabko B., Astola J., Gammerman A.* Application of Kolmogorov complexity and universal codes to identity testing and nonparametric testing of serial independence for time series // Theoretical Computer Science. 2006. V. 359. P. 440–448.

12. *Panteleeva S., Reznikova Z., Vygonyailova O.* Quantity judgments in the context of risk/reward decision making in striped field mice: first “count,” then hunt [Электронный ресурс] // Frontiers Psychology. 2013. Vol. 4(53). URL: http://dx.doi.org/10.3389/ fpsyg.2013.00053.

13. *Tinbergen N.* The Study of Instinct. L.: Oxford University Press, 1951. P. 228.

14. *Whishaw I.Q., Kolb B.* The Behavior of the Laboratory Rat: A Handbook with Tests. Oxford University Press, 2004. P. 520.

Управление верхней конечностью робота с помощью когнитивной модели, основанной на компактном внутреннем представлении

С.А. Лобов[1], А.В. Дудник[1], Х. Виллакорта-Атиенза[2], В.А. Макаров[1,2]

[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2]Мадридский университет Комплутенсе, Мадрид, Испания

Для осуществления моторного контроля и навигации в пространстве наш мозг формирует внутреннее представление тела и окружающего мира. Ранее мы продемонстрировали, каким образом внутреннее представление может быть реализовано нейронной сетью и как нейронная сеть может решать задачи навигации в присутствии движущихся объектов [1]. Ключевым моментом является использование компактного внутреннего представления (КВП), которое позволяет «свернуть» время и, таким образом, кодировать прогнозируемую динамическую ситуацию в форме статичного паттерна, генерируемого нейронной сетью.

Ранее мы использовали КВП для решения задач управления локальными объектами – мобильными роботами [2]. В настоящей работе предлагается подход, позволяющий расширить концепцию КВП на управление протяженными в пространстве объектами, в частности верхними либо нижними конечностями.

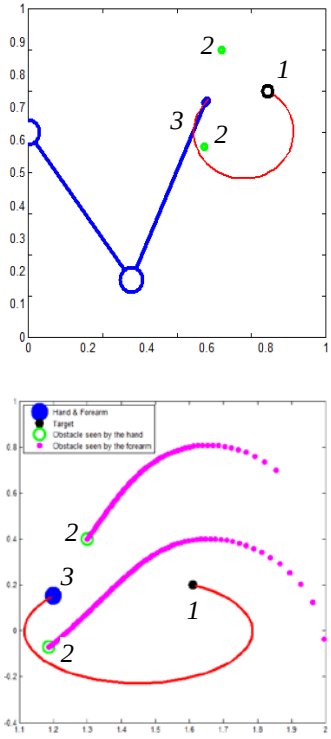


Рис. 1. Схема решения задачи внутреннего представления в реальном пространстве (*вверху*) и в пространстве руки (*внизу*): *1* – цель; *2* – препятствия для руки; *3* – рука

На рис. 1 вверху представлен схематический двухзвенный манипулятор. Очевидно, что при его движении к цели *1* необходимо избегать контакта с препятствиями *2* всеми звеньями манипулятора, что затрудняет использование КВП. Предлагаемый подход заключается в математическом преобразовании реального пространства в пространство руки (рис. 1, *внизу*). В результате управляемая конечность преобразуется в точку, точечные препятствия – в кривые, а протяженные – в объекты сложной формы. Далее задача движения к цели сводиться к ранее изученной, т.е. к управлению локальным объектом с помощью КВП.

Для иллюстрации предлагаемого подхода мы использовали гуманоидного робота NAO (рис. 2). Целью являлся раскачивающийся мяч, а препятствием – коробка. В первом случае кисть робота двигалась по кратчайшей траектории от исходного положения до точки захвата мяча, что приводило к тому, что робот задевал препятствие и не мог поймать мяч (рис. 2, *слева*). Во втором случае траектория движения руки определялась когнитивной моделью, основанной на КВП в пространстве руки. В результате этого рука огибала препятствие и робот успешно ловил мяч (рис. 2, *справа*).

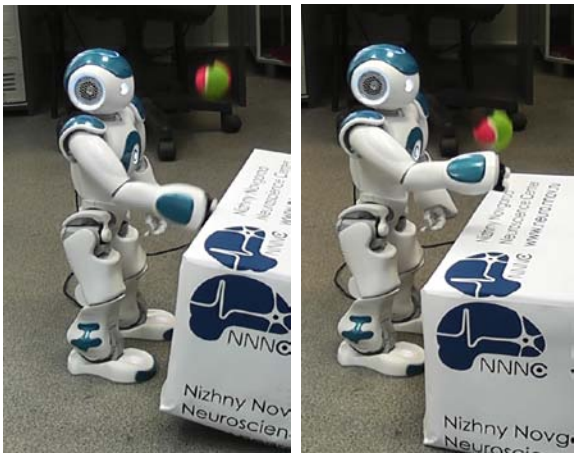


Рис. 2. Пример «неудачного» (*слева*) и «удачного» (*справа*) решения задачи захвата мяча роботом

Работа поддержана грантом РНФ № 15-12-10018.

Литература

1. *Villacorta-Atienza J.A., Velarde M.G., Makarov V.A.* // Biological Cybernetics. 2010. V. 103. P. 285.

2. *Villacorta-Atienza J.A., Makarov V.A.* // IEEE Tran. Neural Netw. Learning Syst. 2013. V. 24. P. 2075.

Векторный принцип кодирования в мозге образной информации

Г.В. Лосик, С.Я. Килин, В.А. Кульчицкий

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Среди научных школ, известных в области изучения психофизиологии мозга [1, 9, 7, 15, 16] самостоятельной является школа Е.Н. Соколова [3, 7, 10–13]. Принцип научного исследования «человек – нейрон – модель» отличает эту школу от других, в которых не столь много внимания уделяется «математизации» получаемых эмпирических данных. В этой школе в рамках многолетних исследований получил новое виденье целый ряд явлений психики: ориентировочный рефлекс, концептуальная рефлекторная дуга, стимулзависимое и эффект-зависимое обучение нейронов, феномен существования предетекторов, локальных анализаторов, обнаружение дополнительной, четвертой, признаковой шкалы в цветовом восприятии человека. Однако наиболее ярким является открытие, сделанное школой Е.Н. Соколова в области математической психологии анализаторов. Им предложена сферическая модель восприятия [12], предлагается выделять в функционировании нейронов не один, а два механизма кодирования сигналов: кодирования цепочкой нейронов и кодирование вектором взаимного местоположения нейронов.

Векторный принцип кодирования сигналов

Векторный принцип кодирования понимается так, что в зависимости от физических различий сигналов происходит обучение отдельных локальных групп нейронов-детекторов в нейронных слоях отвечать не одинаково на разные сигналы в разных местах мозга, в конкретных физических местах мозга [12]. Воспринимаемые стимулы в зависимости от различий своих физических свойств обучают разные нейроны-детекторы отвечать на стимул одинаково и однообразно в строго постоянных, но разных местах мозга. Нейроны-детекторы образуют *локальный анализатор*. В его границах анатомическая удаленность одного нейрона от другого хранит информацию о степени несходства качества двух информаций. Для анализа принципиально разных качеств сигналов нейронная сеть распараллеливает обработку сигналов и формирует в разных местах несколько локальных анализаторов. По этому принципу место расположения нейрона в пространстве сенсорной и моторной коры мозга кодирует специфику той информации, которую оно хранит. Установлено, что у группы детекторов имеется группа предетекторов [11, 12], благодаря которым возникает сферичность, т. е. нечувствительность детектора к амплитуде стимула. Детекторы, сравнивая стимулы между собой, измеряют в стимуле, что существенно, не столько его энергетическую силу, сколько «антропологическое» качество. Принцип кодирования жестким местом хранения, или принцип векторного кодирования [12. С. 66], противопоставляется алгоритмическому принципу кодирования.

Детекторы низших уровней, выделяя мелкие признаки, возбуждаясь, выдают сигналы на следующие экраны детекторов, специализирующиеся на выделении более крупных признаков, целых явлений, например, лица человека, геометрических форм, типов эмоций, гласных фонем [7, 11–13]. Благодаря этому укрупнению возникает предметность восприятия.

На основе векторного принципа кодирования реализуется механизм создания *топологической* нейронной (физической) модели стимула, механизм ее активизации [5]. Данный принцип объясняет, прежде всего, механизм оценки сходства стимулов-образов. Это механизм *аналоговой* оценки стимулов; он не отрицает существования механизма *метрической* оценки стимула, при котором сходство стимулов измеряется количественно по их сугубо объективным параметрам [11].

Отличие векторного кодирования от кодирования условным рефлексом

На первый взгляд, идея кодирования местом повторяет идею условного рефлекса. Стимул, многократно повторяясь в сочетании с другим стимулом, формирует после себя в мозге нервную связь между нейронами. Но на самом деле идею векторного кодирования невозможно объяснить идеей формирования условного рефлекса на «точечный» стимул [8], хотя вторая идея является основой для первой. Свойство сферичности не рассматривается в условном рефлексе, но именно оно принципиально: благодаря предетекторам сигнал обучает свой детектор так, что последний становится малочувствительным к его амплитуде. Детектор распознает в сигнале не столько его объективные параметры: силу, спектр, длительность, сколько его «качество» быть отличным от других сигналов. Поэтому благодаря такой метрике, навязываемой изнутри, метрике субъектного несходства (удаленности) сигналов, появляется возможность кодировать «цель» поведения разумной системы. Называя *качеством* некоторое свойство сигнала, мы оттеняем появление в отраженном явлении, в образе сигнала – черт самой системы отражения, а не только черт отражаемого сигнала. Подобно тому, как в своих работах В.М. Аллахвердов констатирует теоретически, что «знания… могут зависеть и от познаваемой реальности, и от познающей системы» [2], Е.Н. Соколов обнаружил это явление в работе нейронной сети экспериментально и работу механизма предетекторов описал математически.

В условном же рефлексе цепочкой нейронов отражается сугубо объективная характеристика отражаемого сигнала: *причинно-следственная* связь двух сигналов.

Второе открытие Е.Н. Соколова при векторном кодировании состоит в обнаружении в мозге механизма запечатления формы явления, т. е. *топологии* внешнего явления как явления *пространственного*, а не причинно-следственного. При «точечном» одномерном стимуле в условном рефлексе идея векторного кодирования не обнаруживает себя. Она становится понятной, если стимул представлен в виде протяженного в пространстве объемного предмета. Согласно векторному кодированию в нейронах, форма предмета как топологическое нерасчлененное целое запечатляется в топологии взаиморасположения на поверхности сферы набора точек-детекторов. И только такая ее нейронная модель в состоянии запоминать возможные топологические преобразования с формой реального предмета, в аналоговом виде запоминать не амплитуду, а вектор, направление преобразования формы. В ряде известных в психологии работ [11] показано, что восприятие имеет механизм как метрического, так и топологического сравнения стимула с эталоном в мозге. В идее условного рефлекса важной является лишь информация о последовательности нейронов в сформировавшейся в рефлексе их цепочке. Рефлекторная цепь кодирует лишь причинно-следственную закономерность, вскрытую мозгом в сигналах, ее сформировавших, но не их топологию расположения относительно друг друга во внешнем пространстве. Топологическая же форма предмета как объективная его реальность не содержит в себе причинно-следственных отношений между ее частями. Поэтому в идее условного рефлекса не представлена идея, согласно которой степень близости анатомического расположения нейронов может кодировать не обязательно причинно-следственную связь стимулов, а и физическую пространственную близость стимулов в реальном мире.

Условный рефлекс отражает принцип кодирования в мозге стимулов *дискретным* кодом, в то время как векторное кодирование – принцип *аналогового* кодирования. Кодирование последовательности событий в виде условного рефлекса, цепочкой нейронов есть кодирование алгоритмом. Векторное кодирование есть кодирование физической моделью, перенесение извне вовнутрь мозга топологии внешнего пространственного события, имеющего форму и степени свободы ее вариации. Будучи аналоговым явлением, оно поддается аналоговому «искривлению». Субъект, как воспринимающая система, имеет возможность *искривлять* физику стимула, кодируя этим подчерком искривления цель, замышляемую им в планировании функции использования этого стимула для себя, для вида функции использования навыка как стереотипного действия [4].

Редукционизм и векторное кодирование

В адрес идеи векторного кодирования неправомерна критика парадигмы реактивности, *редукционизма* [8]. Идея векторного кодирования применима к созданию копии в мозге не только материальных конкретных объектов внешней действительности, но и абстрактных психических понятий и явлений, кодированию абстрактных действий, движений человека [3, 10, 12]. Известна способность человека не только распознавать по отдельности предметы, движения, понятия, мысли, но и удивительно быстро и легко оценивать меру сходства абстрактных понятий, мыслей, категорий, близких жестов, ассоциировать абстрактные явления по сходству [5]. Векторное кодирование как принцип вводится не взамен принципа вербального кодирования абстрактных понятий, а для дублирования его. Вербализация и речевое запоминание понятий приводит к запоминанию их цепочкой нейронов. Но в мозге реализуется кодирование тех же абстрактных понятий еще и метрикой разнесения их далеко/близко друг от друга [10].

Сенсорная кора мозга человека, синапсы детекторов, подчиняясь стимул-зависимому правилу обучения, членят пространственное окружение субъекта на предметы. Благодаря этому возникает предметность восприятия. Аналогично формируется структура моторной коры в виде экранов командных нейронов. С помощью сети прекомандеров (нейронов, аналогичных предетекторам) командные нейроны одного экрана становятся сферической моделью, где каждый нейрон хранит не силу, а качество действия, которое под его управлением совершают мышцы [3, 12]. Если в сенсорной коре нейроны-детекторы обучаются по стимул-зависимому принципу, то в моторной коре командные нейроны обучаются и дислоцируются на сферической поверхности в дискретных местах по эффект-зависимому принципу. Благодаря этому второму принципу в командных нейронах формируются только такие жесты, от которых один и тот же предмет сопровождается вереницей жестов и при этом, что важно, не разрушается. То есть жесты передают друг другу *по эстафете не разные, а один и тот же предмет,* не мельтешат в выборе предмета действия, в замене выбранного предмета на новый.

Идея антропометрического сходства места хранения стимула у разных людей

В концепции векторного кодирования ее авторы ограничиваются рассмотрением только случая повторного возбуждения нейрона от повторного сигнала у одного и того же индивида. В то же время ими подготовлена почва для идеи антропометрического сходства места хранения сигнала у разных людей: человека-передатчика и человека-приемника. Антропометрическое сходство строения мозга у разных людей позволяет, нам кажется, объяснить механизм не только повторного поступления смыслового сигнала *к одному и тому же* человеку, но и передачи смысла сообщения *от человека к человеку* [10, 14], передачи из-за анатомического совпадения мест возбуждения однотипных нейронов у обоих людей: передатчика и приемника.

Из идеи кодирования местом возбуждения следует, что у двух индивидов в онтогенезе благодаря одинаковому в обучении набору предметов-сигналов, воспринимаемых ими зрительно, тактильно, на слух, благодаря одинаковой рецептивной системе, одинаковым в сенсорной коре проводящим путям формируется набор детекторов с примерно одинаковой топологической, а значит, и азимутной дислокацией их взаиморасположения в нейронах. Множество предметов, окружающих ребенка в онтогенезе, многообразно. Но в этом многообразии есть наборы и однородных предметов. Формирование мозгом «сферических» локальных анализаторов раскрывает тенденцию сенсорной коры объединять разнообразные явления в наборы однородных, чтобы внутри набора обходиться малым общим набором признаковых шкал для аналогового вычисления их удаленности друг от друга.

Идея векторного кодирования реализуется в ходе онтогенетического усвоения индивидом не «точечных», а, прежде всего, объемных «предметных» сигналов и овладения навыками манипулирования ими. После того как у двух индивидов оказывается сформированной сенсорная кора для восприятия, моторная кора – для движений, предъявление им обоим одного и того же предмета, получение от обоих одного и того же жеста с учетом векторного кодирования обязательно будет связано с одинаковой у обоих азимутной дислокацией в их мозге возбуждения детекторов и командных нейронов. У обоих индивидов из-за нечувствительности к амплитуде сигналов, возбуждения топологически одинаково расположенных детекторов и командных нейронов мозг примет примерно одинаковое топологическое строение.

При речевой коммуникации один человек является передатчиком события о том, что в его мозге возбудился детектор D_α, а другой человек, принявший посредством слова это сообщение, – приемником его. Второй должен в своем мозге возбудить в аналогичном локальном анализаторе аналогичный нейрон-детектор. Тем самым один собеседник узнает, что за событие из множества произошло в голове другого собеседника.

Сходство идеи коннектона и когнитона с векторным принципом кодирования

В настоящее время широко обсуждается концепция «коннектона» и «когнитона» для объяснения работы мозга на нейронном и информационном уровнях [3, 6]. В идее коннектона прослеживается та же, что и у Е.Н. Соколова, попытка нейрофизиологов формализовать работу нейронов в кодировании сигналов, сместив центр тяжести с кодирования «причины – следствия» на кодирование «топологией» нейронов. Предложена идея хранения нейронами, их сетью, данных о событиях не в графовой, а сугубо топологической форме. Но эта идея пока не объясняет механизма оценки сходства/различия образов, который вскрыт в концепции векторного кодирования [12]. О чем говорит тот факт, что понятие когнитона отделено в этой концепции от понятия коннектона? Он говорит о том, что авторы новой концепции, так же, как Е.Н. Соколов в векторном кодировании, видят два аспекта: аспект физиологического носителя информации (степени анатомической близости нейронов – в аспекте коннектона) и аспект «закачки» информации на носитель (когнитивного усвоения объективной, субъективной и социальной информации как составляющих азимутного угла – в аспекте когнитона).

Возможность кодирования целеполагания

В ряде работ [6, 8] приводятся логические рассуждения в пользу того, что условный рефлекс не может кодировать целеполагание. И это так: в условном рефлексе (в парадигме И.П. Павлова) при его формировании кодируется только причинно-следственная связь явлений реальности. Но мы показали, что стимул, если он суть *предмет* с *формой*, то он имеет для воспринимающей системы информацию еще и не казуальной природы. Чтобы смоделировать *форму*, т. е. не каузальную информацию, мозг создает в себе для такого сложного, неточечного стимула его топологическую копию, а не только линейную во времени. Формируя линейный рефлекс, мозг кодирует казуальную природу внешних явлений, кодирует ее последовательностью внутренних явлений, т. е. алгоритмом. Информация о локализации хранения в мозге этой информации в виде алгоритма – не принципиальна. В то время как топология формы стимула может запомниться только топологией нового носителя информации о форме.

Идея алгоритма такова, что в его дискретной логике невозможны вариации. Физическим же телам, которыми пользуется субъект, в большинстве случаев позволительно варьировать в определенных рамках по форме с сохранением постоянной их функции для субъекта. Алгоритмическим кодированием обеспечивается помехоустойчивость хранения модели и передачи ее другому субъекту. Но это кодирование одновременно лишает субъекта возможности кодировать в отражаемом явлении функцию его для себя, цель действий с ним. Именно эти вариации субъект может внести в топологию отражаемого явления, запечатлевая его форму не алгоритмом, а топологией мест нейронов. Поэтому отражаемое явление, согласно концепции векторного кодирования Е.Н. Соколова, запечатлевается в мозге двояко: как в аналоговой, так и в дискретной формах.

Заключение

1. Свойство нивелировать по ходу обработки стимулов их амплитуду является фундаментальным свойством нервной системы искривлять физику тел в сторону нечувствительности когнитивной системы к энергии и материальной сущности стимула.

2. Свойство, представленное сферической моделью запоминать стимулы вектором, является

фундаментальным свойством нервной системы, позволяющим передавать из прошлого в будущее знания о предмете и о его функции, цели действия с ним – особям, имеющим одинаковое антропометрически материальное строение носителя этого знания.

3. Благодаря двум принципам запоминания в мозге внешних сигналов: цепочкой нейронов или топологическим местом – реализуется как алгоритмический, так и физический, как дискретный, так и аналоговый принцип кодирования информации. Два принципа кодирования позволяют воспринимающей системе при обработке внешних сигналов устанавливать не только порядок их *следования во времени*, но и *назначение* предмета и *цель* действия. Установление порядка и закономерности есть поиск воспринимающей системой *алгоритма*. Дискретное кодирование в филогенезе сохранилось потому, что в аналоговой форме сообщение, содержащее антропологический смысл, вывести наружу мозга невозможно. В противоположность этой форме в дискретном коде сообщение может выдаваться наружу мозга для передачи его знаками другому субъекту. В то же время аналоговое кодирование слабо тем, что не может находить алгоритмические закономерности в потоке сигналов. Но зато при аналоговом кодировании азимутный угол кодирует информацию о цели действия, назначении предмета, смысле понятия.

Литература

1. *Александров Ю.И.* Нейрон. Обработка сигналов. Пластичность. Моделирование : фундаментальное руководство. Тюмень, 2008.

2. *Аллахвердов В.М.* Сознание в логике познания // Материалы пятой Международной конференции по когнитивной науке. Калининград, 2012. С. 216.

3. *Вартанов А.В.* Механизмы семантики: человек – нейрон – модель // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2012. № 1/2. С. 36–52.

4. *Винер Н.* Кибернетика или управление и связь в животном и машине. 2-е изд. М. : Советское радио, 1968. 328 с.

5. *Гончаров О.А., Емельянова Н.Е., Тяповкин Ю.Н.* Топологический и метрический принципы обработки пространственной информации: перцептивные и возрастные закономерности // Психологический журнал. 2011. Т. 32, № 1. С. 87–96.

6. *Дубровский Д.И.* Проблема расшифровки мозговых кодов явлений субъективной реальности // 1-я Всерос. науч. школа «В будущее наук о мозге и интеллекте». М., 2009. С. 67–72.

7. *Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Коршунова С.Г.* Цветовое пространство человека, основанное на данных корковых вызванных потенциалов // Сенсорные системы. 2003. Т. 7, № 1. С. 1–13.

8. *Крылов А.К.* Поведение и активность нейронов: целенаправленность или реакция // Когнитивные исследования : сб. науч. тр. Вып. 5. М. : ИП РАН, 2012. С. 32–43.

9. *Лебедев А.Н.* Нейронный код // Психология. 2004. Т. 1, № 3. С. 18–36.

10. *Лосик Г.В.* Особенности кодирования и обработки текстовой и аналоговой информации в мозге человека // Материалы конференции «РИНТИ-2012». Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2012. С. 130–138.

11. *Соколов Е.Н., Измайлов Ч.А.* Цветовое зрение. М. : Изд-во МГУ, 1984.

12. *Соколов Е.Н.* Восприятие и условный рефлекс. Новый взгляд. М. : МГУ, 2003. 288 с.

13. *Соколов Е.Н., Измайлов Ч.А., Завгородняя В.Л.* Многомерное шкалирование знаковых конфигураций // Вопросы психологии. 1985. № 1. С. 133–139.

14. *Фридланд А.Я.* О сущности информации: два подхода // Информационные технологии. 2008. № 5. С. 75–84.

15. *Иваницкий Г.А., Наумов Р.А., Иваницкий А.М.* Технология определения типа совершаемой в уме мысленной операции по рисунку электроэнцефалограммы // Технологии живых систем. 2007. Т. 4, № 5/6. С. 20–28.

16. *Анохин П.К.* Очерки по физиологии функциональных систем. М., 1975. 210 с.

Обучение гомологиям из облака точек

Н.Г. Макаренко

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург
ng-makar@mail.ru

Необходимость в моделировании своей локальной окрестности возникает для умной системы при попытке реализовать любое произвольное действие. Последним может быть даже априорное созерцание. Проблема заключается в точности, с которой модель соответствует оригиналу. Хорошо, если модель является гомоморфизмом, т.е. сохраняет групповые свойства (симметрии) оригинала. Наиболее полезным свойством нашего восприятия или устройства природной окрестности является ее масштабная инвариантность, скейлинг или мультифрактальность. Именно она позволяет нам узнавать предметы независимо от расстояния. Более того, в распознавании образов мы часто используем такие фрактальные вещи, как *сингулярные многообразия*. Они кодируют изображения скачками градиентов их меры. Полученный шарж, несмотря на свой бинарный характер, весьма информативен: ассоциативная память часто помогает нам узнать человека по фотороботу или характерному профилю.

Альтернативой является изоморфизм, т.е. взаимно однозначное соответствие модели и оригинала. Он более всего желателен для аналитической модели, когда мы разбиваем реальность на факты и пытаемся связать их в единое целое с помощью причинно-следственных отношений. Связь реализуется обычно в форме дифференциальных или разностных уравнений, от которых часто ожидают предсказательных возможностей: *savoir c'est prevoir*. Решение получают стратегией линейности и разделимости, для того чтобы удовлетворить требованиям теоремы существования и единственности. Аналитический контекст оказался настолько эффективным, что Юджин Вигнер выдвинул тезис о «непостижимой эффективности математики» в естественных науках. К сожалению, математика избыточна в смысле определений. Она дает целый букет *возможностей*, без оценки их *реализуемости*. Последний относят к области эксперимента.

Вообще говоря, непонятно почему Реальность допускает аналитическое описание. Является ли эта особенность свойством самой реальности либо ограничением нашего мышления? Последнее тесно связано с аналитическим контекстом. Так, мы различаем и охотно используем *формы* предметов, предпочитая метрику, а не топологию. Мы считаем форму красивой, если она представляет собой кусочно-линейное, дважды дифференцируемое многообразие. Хорошо еще, если многообразие вложено в трехмерное пространство *трансверсально*: ведь мы воспринимаем целесообразность как красоту. Отклонения от гладкости вполне приемлемы. Они с успехом используются в живописи в форме элементарных катастроф. Так, складки, сборки и ласточкины хвосты являются основой текстур гравюр А. Дюрера (*Адам и Ева*) и японских *Рю* (драконов).

Следующим подходом к моделированию является группа произвольных нелинейных и непрерывных преобразований. Она приводит к топологическим моделям, в которых формы не имеют значения. Мы неявно используем *большие диффеоморфизмы Д'Арси Томпсона* при распознавании лица, искаженного гримасой. Такие диффеоморфизмы кодируют наши душевные состояния мягким языком невербальной семиотики: в скульптурах (*Мыслитель* Огюста Родена), в балете или, в более рафинированном виде, в пантомимах.

Первая действительно топологическая модель окружения принадлежит, по-видимому, Джону О'Кифу и Джонатану Достровскому[1]. Они обнаружили в 1971 г. окрестностное пространство в гиппокампе, образованное так называемыми нейронами места. В топологии *теорема о нерве* утверждает, что покрытие точечного множества дисками или шарами гомотопно нерву, т.е. глобальной симплициальной структуре, составленной в R^2 из точек (0-симплексов), ребер (1-симплексов) и треугольников (2-симплексов).

Для облака из N точек в топологическом пространстве существуют различные методы составления комплексов. Чаще всего используется комплекс Вьеториса – Рипса, основанный на самих точках и $N \times N$ матрице попарных расстояний. Для заданного масштабного параметра ε симплициальный комплекс S_ε строится посредством включения точек как 0-симплексов и k-симплексов, образованных наборами из $k+1$ точки, для которых попарные расстояния не превышают ε. Такой комплекс может содержать циклы, образованные замкнутой последовательностью ребер. Циклы могут служить границей грани, т.е. «заштрихованной» клетки, или окружать дыру. В первом случае цикл можно стянуть в точку движением по грани, границей которого он является. Во втором случае цикл идентифицируется с дырой. Дыры являются наиболее существенными элементами комплекса и генерируют так называемую группу k-мерных гомологий. Ее ранги называют числами Бетти $\beta_k(\varepsilon)$. Эти числа измеряют количество независимых дыр. Для размерности нуль, $\beta_0(\varepsilon)$ измеряет число компонент связности.

[1] Следует, конечно, упомянуть работы Николаса Рашевски, который в 1930-х годах предложил использовать топологию в биофизике.

Одномерные циклы окружают 2-мерные дыры, и число $\beta_1(\varepsilon)$ измеряет ранг одномерной группы гомологий. Числа Бетти являются инвариантами в том смысле, что они совпадают для гомеоморфных пространств.

Понятно, что при разных шкалах мы получим различные симплициальные комплексы и различные гомологии. Однако сам выбор ε часто не очевиден. Если выбрать масштаб слишком малым, мы получим те же гомологии, что и у облака точек. Напротив, слишком большой масштаб приводит к топологическому пространству, эквивалентному большой закрашенной грани, которую можно стянуть в точку. Выход состоит в том, чтобы рассмотреть набор вложенных друг в друга симплициальных комплексов, индексированных параметром ε. Таким образом, последовательности $\varepsilon_1 \le \varepsilon_2 \le \ldots$ соответствует последовательность $S_{\varepsilon_1} \subseteq S_{\varepsilon_2} \subseteq \ldots$. Когда ε изменяется, изменяются и топологические характеристики симплициальных комплексов. Время жизни топологического свойства, измеренное масштабом, называют *персистентностью.* Свойства, персистентные в большом диапазоне, рассматриваются как истинные топологические характеристики, а короткоживущие свойства относят к шуму.

Существуют два пути представить информацию о персистентных гомологиях: баркоды и диаграммы персистентности. Эти инструменты указывают, при каких значениях ε появляется (рождается) топологическое свойство и когда оно умирает. В баркоде горизонтальный отрезок начинается при рождении свойства и заканчивается, когда свойство умирает. Для любого ε число Бетти $\beta_k(\varepsilon)$ есть просто число баров, которые пересекаются с вертикальной линией, проходящей через ε. С другой стороны, диаграмма персистентности изображает гомологическую информацию посредством вложения в декартову плоскость. Горизонтальные и вертикальные оси кодируют параметры рождения и смерти соответственно. Поскольку все компоненты умирают после своего рождения, это вложение реализуется в верхнюю полуплоскость, выше диагонали, как облако точек. Точки вблизи диагонали рассматриваются как шум.

Описанные идеи лежат в основе нового класса моделей, которые называют TDA – *topological data analysis*. В докладе рассказывается о некоторых применениях TDA в исследованиях мозга и сенсорных сетях.

Компактное внутреннее представление когнитивных процессов

В.А. Макаров

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Мадридский университет Комплютенсе, Испания

Основное свойство субъектов, обладающих когнитивными способностями, будь то человек, животное или робот, это понимание окружающего мира в терминах практического взаимодействия с ним. Иными словами, ответ на вопрос: «Что такое интеллект?» – находится в области разумного моторного взаимодействия субъекта с внешней средой и другими организмами. Экспериментальные исследования показывают, что даже простейшие животные демонстрируют удивительно эффективные формы когнитивного поведения. Тем не менее лучшие гуманоидные роботы (например, Asimo Honda, 2012) все еще испытывают серьезные затруднения при решении, на первый взгляд, простых когнитивных задач, таких как, например, движение во встречном потоке пешеходов или манипулирование объектами. Таким образом, исследование и математическое моделирование когнитивных процессов, протекающих в мозге, являются ключом к разработке алгоритмов разумного поведения для нового поколения человекоподобных роботов.

В своей лекции мы покажем, что когнитивные способности человека основываются на внутреннем (ментальном) представлении внешнего мира. Внутреннее представление делает возможным мысленное моделирование внешней среды, планирование целей, тестирование альтернативных поведений и, как следствие, принятие оптимальных решений. Будет введено понятие когнитивных карт как абстрактного элемента, создаваемого нашим мозгом для ориентации в пространстве. Мы рассмотрим одну из важнейших теоретических трудностей, встречающихся в исследованиях внутренних представлений на основе когнитивных карт, – проблему математического описания динамических, т.е. меняющихся во времени, ситуаций. Для решения данной задачи будет описан новый подход, использующий специальные нейронные сети, создающие так называемое компактное внутреннее представление (КВП). Благодаря применению принципа причинности КВП позволяет «понимать» окружающую среду так, как это делают живые организмы и, следовательно, предлагает решения, имитирующие разумное моторное взаимодействие с внешним миром. Результаты математической теории будут проиллюстрированы на примерах использования КВП для управления роботами.

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 15-12-10018.

Топологические свойства семантической сети, представляющей структуру знания: неоднородность и безмасштабность

Н.Е. Максимова[1], И.О. Александров[1], Д.С. Турубар[2]

Институт психологии РАН, Москва
[2] Высшая школа психологии (институт), Москва

Семантические сети – конструкт, открывающий возможности формального и количественного описания психологических структур [6]. Семантическую сеть можно описать как упорядоченное множество вершин, представляющее конструкты, образующие психологическую структуру, например, значения [6], или сущности из предметной области [5], или компоненты структуры знания (СЗ), которые фиксируют информационные модели взаимодействий индивида с предметной областью [1, 4]. Вершины сети связаны ориентированными дугами, представляющими множество отношений между конструктами. Одно из важнейших свойств семантических сетей – распределение степеней вершин, составляющих сеть, т. е. количества дуг, заходящих в определенную вершину и исходящих из нее [7]. Результаты исследований (см. [8, 9]) позволили утверждать, что для случайно формирующихся сетей характерно распределение степеней вершин по случайному закону, а мода распределения является масштабом данной сети. Предполагалось, что у развивающихся, самоорганизующихся, эволюционирующих сетей степени вершин распределены по степенному закону, они не имеют определенного масштаба, *безмасштабны* (*scale-free*) [10]. Сопоставление свойств масштабированных и безмасштабных сетей привело к заключению, что последние более устойчивы, избирательны в отношении объединений и включения новых компонентов, могут приобретать фрактальные размерности (см. [8, 9, 10]). Открытым остается вопрос о свойствах масштабированности или безмасштабности неоднородных сетей, образованных различными типами отношений между вершинами [5], качественно различными вершинами, а также сетей, содержащих локальные подсети с особыми свойствами.

Цель данной работы состоит в том, чтобы охарактеризовать свойства психологических структур, формирующихся в процессе приобретения компетенции, которые могут быть описаны как семантические сети, в терминах масштабированности или безмасштабности организации, оценить совместимость безмасштабности и неоднородности семантических сетей, а также масштабированность или безмасштабность качественно специфичных составляющих психологической структуры.

Характеристики организации семантической сети определяли для структуры знания в стратегической игре двух партнеров. СЗ представляет собой множество компонентов, которым соответствуют группы нейронов, специализированных относительно определенных актов игры как циклов взаимодействия с предметной областью и фиксирующих информационные модели этих разнообразных взаимодействий. Компоненты СЗ связаны отношениями семи типов (см. [1, 2]) в группы – домены (предположительно связанные с семантикой игры), ординарные стратегии, которые в терминах теории графов определяются как простые маршруты, и метастратегии, которые образуются в результате пересечения множеств маршрутов на графе игры. Таким образом, семантическая сеть, описывающая СЗ, неоднородна.

В качестве фактора, определяющего неоднородность сети, рассматривали отношение эквивалентности, связывающее компоненты, дифференцировавшиеся из одного протокомпонента [2] в группы. Компоненты, включенные в такую группу, актуализируются совместно, независимо от того, какому компоненту принадлежит дуга полустепени захода в актуальном маршруте перемещения по сети [1, 2]. Поэтому эти группы следует описывать как единые образования, «псевдовершины», образующиеся при стягивании некоторого множества вершин (см. [3. С. 172]), а сети, содержащие единичные вершины и псевдовершины, – как неоднородные.

Предполагали, что распределения степеней вершин сетей, построенных только из одиночных вершин или включающих также псевдовершины, либо будут аппроксимироваться степенными функциями с разными показателями и одинаковым качеством, либо качество аппроксимации будет меньшим для сетей, неоднородных за счет включения псевдовершин; для ординарных стратегий и метастратегий более правдоподобна одна и та же альтернатива первой гипотезы.

Методика

В исследовании участвовали 98 человек (56 женщин, 42 мужчины, в возрасте от 16 до 27 лет, медиана возраста 20 лет), которые формировали компетенцию в стратегической игре двух партнеров в «крестики-нолики» на поле 15×15. Ка ждая пара продолжала игру, пока не совершала 300 ходов (от 11 до 30 игр). Регистрировали координаты ходов на игровом поле. Для каждого испытуемого строили описание СЗ: перечисление компонентов, отношений между ними, групп компонентов, образованных отношениями различного типа [1]. СЗ описывали как неоднородную семантическую сеть [5], используя отношения следования между компонентами, отношения, образующие устойчивые последовательности компонентов (стратегии), отношения, образующие повторные актуализации компонентов (петли и циклы), а также отношения, связывающие группу компонентов, имеющих общего онтогенетического предка (единый для группы протокомпонент).

На семантической сети, описывающей СЗ в целом (всем множестве компонентов и отношений

между ними), выделяли связные подмножества вершин со степенями больше единицы. Эти подмножества (сети с вершинами со степенями > 1) разделяли на два типа. К первому типу отнесли сети, содержащие единственный маршрут, не имеющий общих вершин с другими маршрутами; их рассматривали как «ординарные стратегии» (ОС), устойчиво воспроизводящиеся в протоколе игр последовательности компонентов («линейные», не включающие петли и циклы, или «циклические», допускающие повторные актуализации компонентов). Второй тип – сети, представляющие метастратегии (МС), которые содержат два или большее количество маршрутов, пересекающихся и имеющих общие вершины. Организацию МС описывали как ориентированный граф в терминах вершин (представляющих компоненты СЗ), дуг с весом > 1 (представляющих отношения, образующие стратегии (см. [1]), простых маршрутов (последовательностей вершин без повторов), петель и циклов [7]. Анализировали организацию графов для совокупной выборки ОС и МС, отдельно для выборок ОС, всей совокупности МС и для максимальных МС (всего 98, по одной для СЗ каждого испытуемого). Критерии определения максимальной МС (в порядке значимости): 1) количество маршрутов, 2) количество пересечений маршрутов, 3) количество петель и циклов, 4) количество вершин.

Для каждого из перечисленных наборов ОС и МС, отдельно для ОС и МС, строили по два варианта семантической сети. В первом варианте неоднородную сеть преобразовывали в однородную, содержащую только простые вершины; для этого псевдовершины расщепляли на простые вершины. Второй вариант описания сети, содержащий два вида вершин – простые и псевдовершины, сохранял свойство неоднородности по разнообразию вершин.

Для каждой ОС и МС, описанных как однородная или неоднородная сеть, строили распределения степеней вершин, аппроксимировали их форму степенной функцией $f(k) = a \cdot k^b$. Использовали процедуру нелинейной регрессии (SPSS 11.2). Для сравнения качества моделей применяли величину 95 % доверительного интервала, оценку стандартной ошибки, коэффициент детерминации $R^2 = 1 - Residual\ SS / Corrected\ SS$.

Результаты и их обсуждение

Сопоставление характеристик степенных функций, аппроксимирующих распределения степени вершин для совокупного набора ОС и МС (рис. 1), выборок МС (рис. 2) и максимальных МС (рис. 3), показывает, что соответствие распределения степенному закону определяется достаточно надежно только для преобразования сети в однородную: во всех случаях коэффициент R^2 для аппроксимаций для сетей, описанных как неоднородные образования, ниже, чем для их однородной модификации. Оценки стандартной ошибки (*st. err.*) во всех случаях снижаются при преобразовании сети в однородную (ср. *А* и *Б* на рис. 1–4).

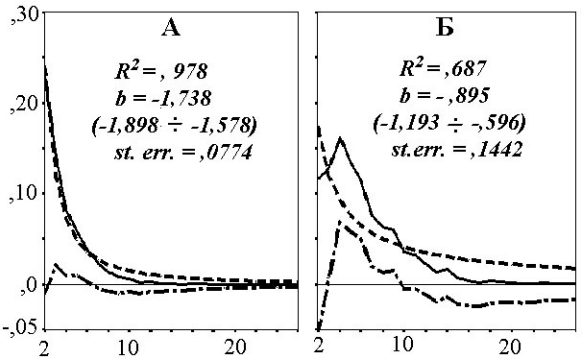


Рис. 1. Степенные функции для всей выборки метастратегий и ординарных стратегий. *А* – описание структуры знания как однородной; *Б* – неоднородной сети. По оси абсцисс – степени вершин, по оси ординат – плотность вероятности распределения степеней вершин. Сплошная линия – эмпирическое распределение; пунктирная – аппроксимирующая функция $f(k) = a \cdot k^b$, штрихпунктирная – остатки. R^2 – коэффициент детерминации, b – оценка показателя степенной функции, в скобках – 95 % доверительный интервал, *st. err.* – оценка стандартной ошибки

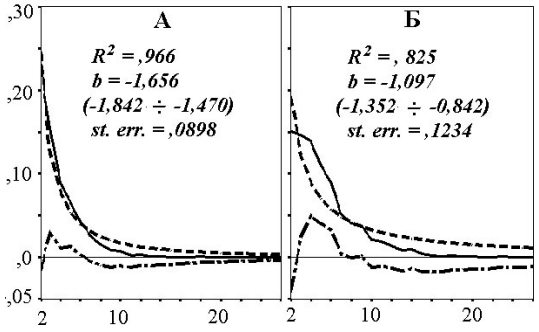


Рис. 2. Степенные функции для всей выборки метастратегий. Все обозначения, как на рис. 1

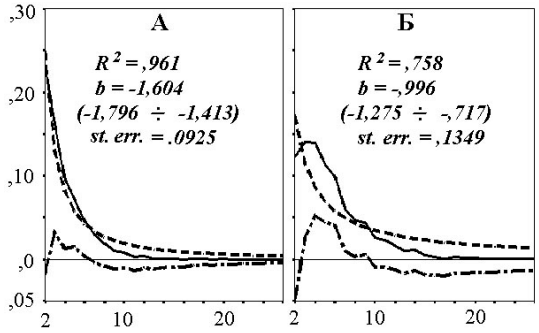


Рис. 3. Степенные функции для выборки максимальных метастратегий. Все обозначения, как на рис. 1

Отмеченные соотношения характеристик аппроксимаций наиболее выражены при разделении выборки вершин максимальных метастратегий на одиночные (рис. 4, *А*) и псевдовершины (рис. 4, *Б*). Эти распределения описывают не смешанные сети (включающие как одиночные, так и «стянутые», псевдовершины), а искусственно «ректифицированные» подмножества вершин, только одиночных (рис. 4, *А*) или только псевдовершин (рис. 4, *Б*). Заметим, что удаление из сети либо одиночных вершин, либо псевдовершин может разрушить вершинную связность сети [3]. Однако анализировали не свойства сетей, возможно утративших вершинную связность после удаления вершин

какого-либо типа, а распределения степеней подмножества вершин и псевдовершин исходного графа. Из всех вариантов аппроксимации распределения степеней вершин рассмотренных неоднородных сетей наибольшее отклонение от степенной функции получено для подмножества псевдовершин (рис. 4, *Б*; ср. с фрагментами *Б* на рис. 1, 2, 3).

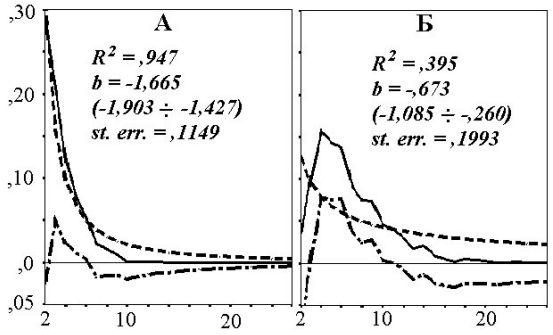


Рис. 4. Степенные функции для выборки максимальных метастратегий: *А* – только для одиночных вершин, *Б* – только для псевдовершин. Остальные обозначения, как на рис. 1

Учитывая значения доверительного интервала для ректифицированной однородной сети, однородность которой достигнута искусственно, через расщепление псевдовершин (см. рис 4, *А*), значение степени *b* не отличается от значений этого коэффициента, полученного для однородных «естественных» сетей (ср. значения показателя степенной функции *b* и диапазоны доверительных интервалов на фрагментах *А* рисунков 1, 2, 3 и 4). Эти значения достоверно снижены относительно величины коэффициента, считающегося типичным для безмасштабных сетей [8]. Тем не менее результаты аппроксимации достаточно надежно характеризуют распределения степеней вершин в однородных сетях как степенные, что позволяет отнести их к классу безмасштабных.

Распределения степеней псевдовершин (фрагменты *Б* на рис. 1, 2, 3 и 4) не описываются степенными функциями. Это следует из сниженных значений коэффициента R^2, высоких значений стандартной ошибки и визуально определяемого локального пика распределения, который соответствует степени псевдовершин, равной четырем (см. рис. 3 и 4). На этом основании можно было бы сделать вывод о том, что сети, неоднородность которых определяется включением псевдовершин, не относятся к классу безмасштабных, однако это заключение вступает в противоречие с результатами аппроксимации распределений вершин для ординарных стратегий (см. рис. 5).

Эти результаты показывают, что оригинальная форма распределения степеней вершин и псевдовершин, составляющих ординарные стратегии (рис. 5, *Б*), достаточно хорошо описывается степенной функцией и не имеет пиков, аналогичных отмеченным на распределениях для метастратегий (рис. 2, 3, 4, фрагменты *Б*).

Заметим, что показатель степенной функции *b* весьма высок – как для оригинального представления ординарных стратегий, включающего псевдовершины (рис. 5, *Б*), так и при их расщеплении на одиночные вершины (рис. 5, *А*), значения показателя степени выходят за пределы –3.

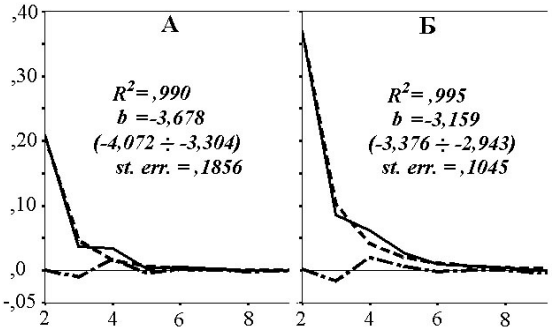


Рис. 5. Степенные функции для всей выборки ординарных стратегий. Показана только начальная часть оси абсцисс. Все обозначения, как на рис. 1

Таким образом, безмасштабность как свойство семантической сети не следует связывать с ее однородностью, по крайней мере с однородностью, определенной отсутствием вершин особой природы (в рассмотренном случае – псевдовершин).

Псевдовершины образуются как при развитии метастратегий, так и при формировании ординарных стратегий. При этом ординарные стратегии формируются как безмасштабные. По-видимому, масштабирование сетей, описывающих метастратегии, можно связать с особой ролью вершин-концентраторов в функционировании метастратегий; с местом, которое занимают в организации метастратегий циклы, а также дуги, образующие петли; со спецификой траекторий эволюции семантической сети.

Рассмотренные характеристики семантических сетей расширяют возможности формального и количественного описания психологических структур, процессов их формирования и сравнения их организации у взаимодействующих индивидов.

Работа выполнена при поддержке РГНФ, проект № 14-06-00082а.

Литература

1. *Александров И.О.* Формирование структуры индивидуального знания. М. : Институт 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. *Евстигнеев В.А., Касьянов В.Н.* Толковый словарь по теории графов в информатике и программировании. Новосибирск : Наука, 1999.

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

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

6. *Петренко В.Ф.* Психосемантика сознания. М. : Изд-во МГУ, 1988.

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

8. *Barabási A.-L.* The Architecture of Complexity // IEEE Contr. Syst. 2007. V. 27, № 4. P. 33–42.

9. *Barabási A.-L.* Scale-Free Networks: A Decade and Beyond // Science. 2009. V. 325. P. 412–413.

10. *Dorogovtsev S.N., Mendes J.F.F.* Evolution of Networks // Advances in Physics. 2002. V. 51, № 4. P. 1079–1187.

На пути к автоматическому определению интолерантности высказываний в политическом дискурсе и СМИ

А.Ю. Малафеев, К.А. Дружков

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород

Политический дискурс, т.е. определенный класс жанров, ограниченных сферой политики, таких как правительственные обсуждения, парламентские дебаты, партийные программы, речи политиков, является одновременно средством воздействия на общественное мнение и индикатором происходящих в обществе процессов. Этот дискурс представляет собой объект исследований в области политологии, социологии и лингвистики. Одним из важных аспектов политического дискурса является его эмотивная сторона, связанная с отношением индивидов к тем или иным явлениям общественно-политической жизни.

К политическому дискурсу близко примыкает дискурс СМИ. Одна из основных коммуникативных задач этого дискурса – информационная, однако зачастую авторы текстов, публикуемых в СМИ, утрачивают объективность и беспристрастность. Это выражается в предвзятом отношении к описываемым событиям, а также связанным с ними людям, обществам и идеологиям. При этом авторы текстов явно или имплицитно дают эмоциональную оценку тому, о чем они пишут.

Очевидно, что эмоциональная сторона политического дискурса и текстов, публикуемых СМИ, тесно связана с понятием толерантности, т.е. терпимости к иным взглядам, нравам, привычкам, особенностям различных народов и религий [1]. Негативные эмоции, испытываемые по отношению к той или иной группе людей, часто проявляются в интолерантных высказываниях. Степень интолерантности может различаться: иногда высказывания имеют характер намеков, а иногда и открыто призывают к социальной, расовой, национальной или религиозной ненависти и вражде (подобные призывы являются преступлением согласно ч. 1 ст. 282 УК РФ в редакции Федерального закона от 08.12.2003 № 162-ФЗ).

Уровень (ин)толерантности высказываний поддается лингвистической экспертизе. Отечественными лингвистами выполнено немалое количество исследований, посвященных диагностике интолерантности в СМИ и интернет-коммуникации (см., например, [2–4]. Исследователи выделяют маркеры интолерантности на различных уровнях языка – лексическом, синтаксическом, семантическом, но подчеркивают сложность формализации процесса.

Тем не менее, учитывая колоссальный объем текстов, проходящий через СМИ ежедневно, формализация и в особенности автоматизация оценки толерантности высказываний представляется актуальной и перспективной задачей. Человек не может «вручную» проанализировать огромные объемы новой текстовой информации, создаваемой в сети Интернет ежеминутно. Компьютерная система, которая бы решала эту задачу в автоматическом режиме, могла бы быть использована государственными органами по мониторингу нарушений в СМИ, администраторами крупных интернет-форумов, соцсетей и агрегаторов новостей, разработчиками поисковых машин (для фильтрации нежелательного контента) и т.д.

Круг похожих задач компьютерной лингвистики объединен под названием «анализ тональности» (sentiment analysis) [5], т.е. анализ эмоционального содержания текста. При этом может автоматически определяться как тональность текста в целом (положительная, нейтральная или отрицательная), так и эмоциональные оценки конкретных объектов (например, ресторанов) и их «аспектов» (например, обслуживание, цены, обстановка и т.д.). Следует отметить, что поставленная нами задача, т.е. автоматическое определение уровня толерантности высказываний, лишь соотносится с анализом тональности, но не является его разновидностью. Эта задача пока остается нерешенной.

Основанием для того, чтобы считать автоматическое определение уровня толерантности высказываний осуществимым, могут служить недавние успехи в анализе тональности русскоязычных текстов [6, 7] и в решении несколько похожих задач, например по выявлению вербальных следов агрессии в социальных медиа [8]. Первым шагом к достижению цели является собственно постановка задачи и определение возможных путей ее решения.

Нам представляется, что анализ уровня толерантности может быть «поверхностным» и «глубоким». При анализе первого типа необходимо определить степень (ин)толерантности текста в целом, тогда как «глубокий» анализ подразумевает выделение в тексте конкретных фрагментов, которые признаются интолерантными. В последнем случае возможна градация интенсивности проявлений нетерпимости или же оценка вероятности, с которой высказывание является интолерантным. Кроме того, перспективным представляется также классифицировать «вид» интолерантности: этническая, религиозная, политическая и т.д.

Для решения обоих типов задач могут применяться следующие подходы:

- словарно-лексический, опирающийся на словари лексем – маркеров интолерантности, составленные вручную или автоматически, а также различные эвристики;
- машинное обучение (с учителем или без), предполагающее использование большой выборки положительных и отрицательных примеров;

• совмещенный подход, сочетающий правила, составленные вручную, словари, а также алгоритмы машинного обучения.

Лексический подход к анализу тональности показал себя как достаточно эффективный (точность 65–70 %, что является высоким результатом, учитывая, что согласие аннотаторов между собой, как правило, не достигает 80 %). Вероятно, этот подход может применяться и для определения интолерантных высказываний, ведь последние зачастую характеризуются весьма специфичным словарным составом. В качестве очевидного примера можно привести следующие пары слов: *китаец :: китаеза, верующий :: фанатик, коммунист :: коммуняка*.

С другой стороны, словарный подход имеет свои недостатки: во-первых, репрезентативные лексиконы довольно сложно собрать (хотя этот процесс поддается автоматизации), а во-вторых, некоторые слова, употребленные в разных контекстах, могут эксплицировать совершенно разные эмоциональные оценки: *он фанатик своего дела :: в церкви одни фанатики.*

Машинное обучение требует сбора большой коллекции текстов, в которых (в идеале) количество положительных примеров, т. е. интолерантных текстов, должно примерно соответствовать числу отрицательных примеров. При этом обучение с учителем подразумевает еще и аннотирование этих примеров, хотя глубина разметки может варьироваться. Машинное обучение само по себе, без использования лексиконов, может не дать желаемого результата, как показали недавние соревнования в близкой сфере анализа тональности [9]. С другой стороны, машинное обучение способно эффективно учитывать то, что практически невозможно отразить в лексиконах: синтаксис предложений и такие формальные характеристики текстов, как особенности деления текста на абзацы, средняя длина слова/предложения, количество знаков препинания, выделение слов с помощью регистра и проч.

Учитывая вышесказанное, перспективным представляется использовать совмещенный подход. При этом необходимо учесть опыт лингвистов, изучавших лексические, синтаксические и семантические маркеры интолерантности [2, 3, 4]. Лексические маркеры могут быть перенесены в лексикон, а синтаксические и, по возможности, семантические следует закодировать в качестве признаков, подаваемых на вход в алгоритм машинного обучения.

Итак, сначала необходимо собрать данные для обучения и проверки результатов, а именно тексты, содержащие и не содержащие интолерантные высказывания. Объем корпуса во многом обусловливает точность автоматической классификации, однако для обучения с учителем не менее важным фактором является качественная разметка.

Мы планируем начать с машинного обучения с учителем. Что касается конкретных алгоритмов, предполагается использовать те из них, которые традиционно применяются в задачах классификации текстов, а именно: наивный байесовский классификатор, логистическую регрессию и метод опорных векторов (Support Vector Machines).

В качестве способа представления текстов планируется использовать «мешок слов» (bag of words), в котором учитывается частота употребления каждого (лемматизированного) слова в тексте, но не учитывается порядок их следования.

Итак, в данной публикации мы поставили задачу автоматического определения интолерантных высказываний в политическом дискурсе и СМИ и наметили один из возможных путей ее решения. В дальнейшем предполагается реализовать предложенный метод и оценить его эффективность.

Публикация подготовлена в рамках софинансирования Научным фондом НИУ ВШЭ, поддержанного РГНФ научного проекта № 15-04-00534.

Литература

1. Философский энциклопедический словарь / под ред. А. Б. Васильева. 2-е изд. М. : Инфра-М, 2011. 576 с.

2. *Кольцова Е.Ю., Таратута Е.Е.* Измерение толерантности // Журн. социологии и социал. антропологии. 2003. Т. 6, № 4. С. 115.

3. *Иссерс О.С., Рахимбергенова М.Х.* Языковые маркеры этнической ксенофобии : (на материале российской прессы) // Политическая лингвистика. Екатеринбург, 2007. Вып. 3, № 23. С. 90–96.

4. *Паламарчук Н.А.* Способы выражения вербальной агрессии в текстах интернет-комментариев // Актуальные проблемы теоретической и прикладной лингвистики : сб. науч. тр. / под ред. Е.П. Сосниной. Ульяновск : УлГТУ, 2011. С. 19–28.

5. *Liu B.* Sentiment Analysis and Opinion Mining. Morgan & Claypool Publishers, 2012.

6. *Chetvirokin I., Loukachevitch N.* Sentiment Analysis Track at ROMIP 2012 // Proc. Int. Conf. Dialog. 2013. V. 2. P. 40–50.

7. *Лукашевич Н.В. и др.* SentiRuEval: тестирование систем анализа тональности текстов на русском языке по отношению к заданному объекту // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии : по материалам ежегодной Международной конференции «Диалог» (Москва, 27–30 мая 2015 г.). Вып. 14 (21) : в 2 т. Т. 2 : Доклады спец. секций. М. : Изд-во РГГУ, 2015. С. 12–24.

8. *Xu J.-M. et al.* Learning from bullying traces in social media // Proc. 2012 conf. North American chapter of the association for computational linguistics: Human language technologies. Association for Computational Linguistics, 2012. P. 656–666.

9. *Pontiki M. et al.* Semeval-2014 task 4: Aspect based sentiment analysis // Proc. 8th Int. Workshop on Semantic Evaluation (SemEval 2014). 2014. P. 27–35.

Спонтанная организация исследовательского поведения рыб

В.А. Непомнящих, Е.А. Осипова, Н.А. Панкова

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Борок, Московская облfcnm

Когда животное оказывается в незнакомой обстановке, последовательность его передвижений в этой обстановке определенным образом организована. Эта организация наблюдается и тогда, когда действия животного нельзя объяснить реакциями на внешние ориентиры, присутствующие в незнакомой среде. Поэтому наблюдаемая организация спонтанна в том смысле, что она порождается процессами в нервной системе, регулирующими выбор того или иного поведения независимо от внешних сигналов. Следовательно, изучая поведение в незнакомой обстановке, можно судить об этих процессах.

В этом докладе мы (1) опишем организацию передвижения рыб в незнакомой им обстановке; (2) покажем, что эти передвижения можно объяснить набором правил, которые спонтанно сменяют друг друга в течение минут и соответственно изменяют организацию передвижений; (3) обсудим возможные когнитивные процессы, которые могли бы порождать спонтанную смену правил.

Правила передвижения рыб в лабиринте

Мы наблюдали поведение взрослых самцов и самок данио рерио (Danio rerio) и расборы звездной (Danio margaritatus) в крестообразном лабиринте с четырьмя слепыми коридорами, расходящимися из центра под прямым углом. Лабиринт был белого цвета и освещен рассеянным белым светом без теней. В лабиринте и вне его отсутствовали какие-либо ориентиры, которые позволяли бы рыбам отличать один коридор от другого. Рыб кормили ежедневно, однако в лабиринтах корм отсутствовал. Каждую особь помещали в лабиринт по отдельности и вели видеозапись ее передвижений в разных сериях экспериментов, от 15 до 25 мин. Всего получены записи движения 50 особей каждого из названных видов.

В течение первых пяти минут наблюдения частота переходов рыбы из коридора в коридор снижалась, а затем оставалась постоянной. За очень редкими исключениями рыбы никогда не возвращались в тот же коридор, из которого только что вышли в центр лабиринта. При обработке данных коридоры были пронумерованы по часовой стрелке (1, 2, 3, 4) и описание поведения рыб сводилось к последовательности посещавшихся коридоров. В передвижениях рыб можно было выделить типичные последовательности посещений. Эти типичные последовательности были общими для рыб обоих видов, как самцов, так и самок.

1. Обходы не менее четырех коридоров по часовой стрелке или против нее (например, 1234 или 3412). Такое поведение можно объяснить применением простого правила: при выходе из коридора поворачивать всегда влево или всегда вправо. У рыб наблюдалась асимметрия направления движения: одни особи предпочитали обходить коридоры по часовой стрелке, а другие – в противоположном направлении. Это индивидуальное предпочтение сохранялось у особи при повторении эксперимента с перерывом в несколько дней. Однажды начавшись, обход проявлял тенденцию продолжаться. Например, вслед за последовательностью 4321 частота перехода в коридор 4 была выше 0,33 – величины, ожидаемой при случайном выборе коридоров рыбой. Это означает, что обходы представляют собой неслучайную, устойчивую последовательность передвижений.

2. Челночные передвижения между парой смежных коридоров (например, 1212), или парой противоположных (например, 2424). Челночное передвижение засчитывалось, если рыба посещала каждый коридор в паре не менее двух раз (как в приведенных выше примерах). Предполагаемое правило, порождающее такие передвижения: возвращаться в уже посещавшийся коридор сразу после посещения следующего. Однажды начавшись, челночные передвижения, так же как и обходы, проявляли тенденцию продолжаться: например, вслед за последовательностью 3232 частота возвращения в коридор 3 оказывалась статистически значимо выше 0,33. Такие же неслучайные возвращения были характерны для челночных передвижений между любой парой коридоров. Другими словами, челночные передвижения имели тенденцию устойчиво повторяться.

3. Посещения коридоров в случайном порядке, не подчиняющиеся приведенным выше правилам (например, 2432314124…). Следует отметить, что в крестообразных и других лабиринтах с радиально расположенными коридорами у многих животных наблюдается так называемое спонтанное чередование (spontaneous alternation): тенденция при очередном посещении чаще выбирать тот коридор, который не посещался дольше всего. Спонтанное чередование обнаружено у лабораторных крыс [1, 2] и диких видов грызунов [3], а также членистоногих [4]. Считается, что чередование отражает стремление животного к новизне, получению новой информации о среде. Такое чередование наблюдается и в отсутствие внешних признаков, по которым можно было бы отличить один коридор от другого. В этом случае чередование объясняется тем, что животное ориентируется в лабиринте, запоминая последовательность своих передвижений [2].

Внешне спонтанное чередование может напоминать случайную последовательность посещений коридоров. Поэтому мы проверили предположительно случайные последовательности на наличие спонтанного чередования. Обнаружить спонтан-

ное чередование можно следующим образом. Пусть последовательность посещений коридоров в крестообразном лабиринте такова: 423123141324. Эта последовательность разделяют на перекрывающиеся пятерки посещений: 42312, 23123, 31231… Чередование засчитывается, если в пятерке последовательных посещений животное посещает все четыре коридора. В данном примере для первой пятерки посещений 42312 чередование засчитано, а для следующей пятерки 23123 – нет, так как в ней отсутствует коридор 4. Общее число пятерок равно числу всех посещений коридоров в ходе наблюдения минус четыре. Показатель чередования для всей последовательности равен числу пятерок с чередованием, деленному на число всех пятерок. В данном примере общее число пятерок равно 12 – 4 = 8; из них число пятерок с чередованием равно 5; уровень чередования всей последовательности равен 5/8, или 0,625. При случайной последовательности посещений коридоров этот показатель был бы равен 0,4444… [2]. Средние показатели чередования для предположительно случайных последовательностей посещения коридоров в наших экспериментах практически не отличались от случайного уровня. Таким образом, эти последовательности действительно были случайными.

Не у всех рыб обнаруживались все перечисленные выше правила передвижения. Однако у большинства особей наблюдалась смена правил в течение непродолжительного эксперимента. При этом частота обходов, челночных передвижений и случайных последовательностей практически не изменялась в течение эксперимента. Например, рыба могла обходить коридор в начале наблюдения, затем перейти к челночным перемещениям между парой коридоров, затем к таким же перемещениям между другой парой, снова начать обход и т.д. Типичный фрагмент записи посещения коридоров выглядел следующим образом: **43434343**12341234123**12121212121214**3213412142 3421424312434**24242424242424**2432143214321432. Здесь челночные передвижения выделены жирным шрифтом, а обходы подчеркнуты. Случайная последовательность показана обычным шрифтом. Таким образом, правила, определяющие организацию поведения рыбы, могут сменять друг друга в течение 15–25 минут в неизменной внешней обстановке.

Причины смены правил передвижения

Правила передвижения, обнаруженные нами у данио и расборы, порознь ранее наблюдались у разных животных. Систематический обход лабиринта известен у грызунов [5], пресмыкающихся [6] и рыб [7]. Асимметрия направления движения, в том числе асимметрия поворотов в лабиринтах, также известна, в том числе у рыб [8]. В частности, у данио рерио описаны обходы круглого аквариума по периферии [9]. Эти обходы могут быть аналогичными обходам лабиринта в наших экспериментах. Также известны у данио рерио стереотипные передвижения в противоположных направлениях вдоль одной из стенок аквариума [10, 11]. Возможно, они соответствуют челночным передвижениям в лабиринте.

Однако все перечисленные правила передвижения изучались порознь, либо у разных видов, либо у разных особей одного вида, в разных экспериментальных условиях. Насколько нам известно, исследование смены правил передвижения у одной и той же особи в течение одного эксперимента не проводилось. Не известны и причины смены правил.

Смена правил и соответствующего им поведения в наших экспериментах происходила спонтанно, в неизменной среде, без каких-либо пусковых стимулов. При выполнении определенного правила рыбы обращали внимание только на определенные ориентиры в лабиринте, а другие ориентиры игнорировали. Например, во время челночных перемещений между противоположными коридорами рыбы игнорировали два других коридора.

Во время обходов у рыб проявляется асимметрия направления движения, а во время челночных передвижений она отсутствует. Асимметрия в поведении является следствием функциональной асимметрии нервной системы – генетически обусловленного устойчивого свойства организма, сохраняющегося на протяжении длительного времени [8]. То, что она не проявляется при челночных передвижениях, означает, что рыбы могут временно блокировать это свойство. Это означает, что смена правил может быть связана со спонтанным переключением между физиологическими механизмами, управляющими поведением.

Одно из возможных объяснений смены правил может быть основано на концепции внутренней мотивации (intrinsic motivation) [12]. Эта мотивация побуждает животное учиться предсказывать результаты своих действий. Она присутствует у животного постоянно и не связана с удовлетворением каких-либо частных физиологических потребностей. Под влиянием этой мотивации животное выбирает какое-либо действие, предсказывает его результат и затем оценивает ошибку предсказания. Ошибка представляет собой разность между предсказанным и полученным результатом. Исходя из этой ошибки, предсказание корректируется и действие повторяется. Животное запоминает динамику изменений ошибки при повторении действия. Чем быстрее уменьшается ошибка, тем, естественно, успешнее обучение. Если обучение идет успешно, то животное повторяет это действие снова и снова. Так как при повторении любое действие животного неизбежно варьирует, то варьируют и его результаты. Поэтому ошибка предсказания уменьшается постепенно. Если скорость уменьшения ошибки становится меньше некоторой пороговой величины, это означает, что результат действия предсказуем и в дальнейшем обучении нет смысла. В этом случае животное переключается на повторение другого действия. Переключение происходит и тогда, ко-

гда ошибка выше порога, но не снижается при повторении действия. Это означает, что результат этого действия в данной обстановке непредсказуем, а потому его выполнение бессмысленно. Результаты и ошибка предсказания того или иного действия со временем забываются. Поэтому животное может возвращаться к повторению действий, выполнявшихся в прошлом [13].

На наш взгляд, подобным когнитивным процессом можно было бы объяснить и смену правил передвижения у рыб. Например, у рыбы может формироваться предсказание результата поворота влево при выходе из очередного коридора. Для проверки предсказания повороты повторяются. Передвижения рыбы при поворотах и посещениях очередного коридора варьируют. Соответственно варьируют и результаты поворотов, стимуляция, полученная при последовательных посещениях коридоров, несмотря на то, что все коридоры одинаковы. Поэтому для уменьшения ошибки предсказания до порогового уровня может потребоваться многократное повторение поворотов, вследствие чего и наблюдается обход коридора по часовой стрелке. Когда ошибка предсказания достигает порога, рыба выбирает новое правило, и процесс обучения повторяется. Со временем результаты выполнения того или иного правила забываются, и рыба может вернуться к нему снова.

Заключение

Полученные нами экспериментальные результаты и предложенное объяснение этих результатов оставляют нерешенными некоторые вопросы. Во-первых, как выбирается очередное правило передвижения из тех правил, которые рыба может применить в конкретной обстановке? В некоторых моделях поведения, основанного на внутренней мотивации [13], предполагается, что при переключении на новое действие обычно выбирается такое действие, которое в прошлом обеспечивало наиболее быстрое снижение ошибки. Кроме того, с некоторой вероятностью новое действие может быть выбрано случайно. Предстоит проверить, насколько поведение рыб соответствует этим предположениям.

Во-вторых, остается неясным возможное адаптивное значение смены правил передвижения. Известно, что в результате исследования незнакомой среды у животных формируется «когнитивная карта» этой среды. Такая карта формируется и у данио рерио при исследовании лабиринтов: рыбы запоминают взаимное расположение коридоров, даже если те не различаются по цвету или другим признакам [14]. Наличие когнитивной карты позволяет рыбам быстрее обучаться в уже знакомой среде, например запоминать путь к источнику пищи [15]. Возможно, что смена правил способствует более быстрому формированию когнитивной карты.

В-третьих, остается неизвестным, насколько смена правил характерна для других видов рыб, а также представителей других таксонов животных, находящихся на разных уровнях эволюционного развития.

Ответы на все эти вопросы помогут лучше понять когнитивные процессы, лежащие в основе исследовательского поведения животных.

Авторы благодарны РФФИ за поддержку (проекты № 13-01-00399 и 15-04-06379).

Литература

1. *Hliňák Z., Krejčí I.* Spontaneous alternation behaviour in rats: kynurenic acid attenuated deficits induced by MK-801 // Behavioural Brain Research. 2006. V. 168, № 1. P. 144–149.

2. *Lalonde R.* The neurobiological basis of spontaneous alternation // Neuroscience and Biobehavioral Reviews. 2002. V. 26, № 1. P. 91–104.

3. *Jones M.A., Mason G.J., Pillay N.* Correlates of birth origin effects on the development of stereotypic behaviour in striped mice, Rhabdomys //Animal Behaviour. 2011. V. 82, № 1. P. 149–159.

4. *Chiussi R., Diaz H., Rittschof D., Forward R.B., Jr.* Orientation of the hermit crab Clibanarius antillensis: effects of visual and chemical cues // J. Crustacean Biology. 2001. V. 21. P. 593–605.

5. *Dubreuil D., Tixier C., Dutrieux G., Edeline J.M.* Does the radial arm maze necessarily test spatial memory? // Neurobiology of Learning and Memory. 2003. V. 79, № 1. P. 109–117.

6. *Mueller-Paul J., Wilkinson A., Hall G., Huber L.* Response-stereotypy in the jewelled lizard (Timon lepidus) in a radial-arm maze // Herpetology Notes. 2002. V. 5, № 2. P. 243–246.

7. *Hughes R.N., Blight C.M.* Algorithmic behaviour and spatial memory are used by two intertidal fish species to solve the radial maze // Animal Behaviour. 1999. V. 58, № 3. P. 601–613.

8. *Bisazza A., Dadda M., Cantalupo C.* Further evidence for mirror-reversed laterality in lines of fish selected for leftward or rightward turning when facing a predator model // Behavioural Brain Research. 2005. V. 156. P. 165–171.

9. *Swain H.A., Sigstad C., Scalzo F.M.* Effects of dizocilpine (MK-801) on circling behavior, swimming activity, and place preference in zebrafish (Danio rerio) // Neurotoxicology and Teratology. 2004. V. 26, № 6. P. 725–729.

10. *Blaser R., Gerlai R.* Behavioral phenotyping in zebrafish: comparison of three behavioral quantification methods // Behavior Research Methods. 2006. V. 38, № 3. P. 456–469.

11. *López-Patiño M.A., Yu L., Cabral H., Zhdanova I.V.* Anxiogenic effects of cocaine withdrawal in zebrafish // Physiology and Behavior. 2008. V. 93, № 1/2. P. 160–171.

12. *Oudeyer P.-Y., Kaplan F.* What is intrinsic motivation? A typology of computational approaches // Frontiers in Neurorobotics. 2007. V. 1, № 6. P. 1–14.

13. *Oudeyer P-Y., Kaplan F.* Discovering communication // Connection Science. 2006. V. 18, № 2. P. 189–206.

14. *Grossman L., Stewart A., Gaikwad S., Utterback E., Wu N., DiLeo J., Frank K., Hart P., Howard H., Kalueff A.V.* Effects of piracetam on behavior and memory in adult zebrafish // Brain Research Bulletin. 2011. V. 85. P. 58–63.

15. *Sison M., Gerlai R.* Associative learning in zebrafish (Danio rerio) in the plus maze // Behavioural Brain Research. 2010. V. 207. P. 99–104.

Нелинейные методы анализа кардиограммы ребенка, записанной в нейтральном и эмоциональном состояниях

Е.И. Николаева[1,2], Е.Г. Вергунов[3,4], А.В. Добрин[5]

[1]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
[2]Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург
[3]Научно-исследовательский институт физиологии и фундаментальной медицины СО РАМН, Новосибирск
[4]Новосибирский государственный педагогический университет
[5]Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина

Оценка вариабельности сердечного ритма детей представляет собой существенную проблему. Дело в том, что надежные методы обработки описаны только для состояния оперативного покоя. Но сердечный ритм ребенка, даже находящегося в состоянии оперативного покоя, редко соответствует критериям статистической стационарности для временно́го ряда . А ритм ребенка в эмоциональных ситуациях тем более содержит нестационарные участки. Анализ таких участков в записи сердечного ритма предполагает использование инструментов нелинейного анализа.

При этом хаотичности сердечного ритма сопутствует его высокая вариабельность, а увеличению ригидности сердечного ритма – увеличение количества (и длин) повторяющихся групп R-R-интервалов [1, 2]. Хаотичность здесь следует понимать как некий порядок без очевидной периодичности.

При нормативном протекании процесса сердечный ритм хаотичен, т. е. нельзя дать прогноз состояния сердечно-сосудистой системы на сколь угодно большой отрезок времени, даже если бы ее законы были точно описаны с помощью дифференциальных уравнений. И даже более того, мы не смогли бы записать в конечном виде решение такой системы дифференциальных уравнений. Однако можно воспользоваться методами описания динамических систем.

Известно, что регуляция ритма сердца у леворуких и праворуких детей существенно отличается [3]. Именно поэтому важно было опробовать методы анализа динамических систем при обработке кардиоритмограмм детей с разной системой регуляции вариабельности сердечного ритма в различных эмоциональных состояниях.

Материалы и методы

Для ответа на поставленный вопрос было обследовано 145 школьников (средний возраст (7,2 ± 0,4) года). Условием включения в эксперимент было отсутствие хронических заболеваний, наличие синусного сердечного ритма.

Первоначально с помощью совокупности проб был оценен профиль функциональной сенсомоторной асимметрии [3]. В наших предыдущих исследованиях [4] изучалось влияние латерального профиля в целом на особенности регуляции психофизиологических процессов, в том числе динамику сердечного ритма в ситуациях с различными когнитивными воздействиями на испытуемого.

Следующий этап – изучение влияния отдельных элементов латерального профиля. В данной работе изучается вопрос влияния «рукости» (ведущая рука) на динамику сердечного ритма при когнитивных воздействиях, вызывающих эмоциональные состояния различной валентности. Поэтому в дальнейшем мы будем описывать лишь этот параметр («ведущая рука»).

Для обработки измерений сердечного ритма [13] применялась программа Kubios HRV, которая авторам была предоставлена для исследований Восточно-Финляндским университетом (Finland, Kuopio, Department of Applied Physics, Biosignal Analysis and Medical Imaging Group). Статистическая обработка осуществлялась с помощью программы IBM SSPS Statistics версии 23. Расчет чувствительности статистических критериев на изучаемых выборках (Power analysis) был выполнен с помощью программного обеспечения G*Power [9], которое авторам было предоставлено для исследовательских целей (Universität Düsseldorf). Уровни значимости критериев соответствовали [8].

Регистрация сердечного ритма проводилась индивидуально и состояла из трех этапов. Электроды накладывались на руки ребенка в области запястий контактной площадкой с внутренней стороны. Кожу в месте контактов обильно смачивали водой. Ребенок сидел в удобном кресле. На каждом этапе производилась запись 300 последовательных ударов сердца (здесь и далее учитываются удары сердца после обработки технических и биологических артефактов в записи электрокардиограммы – время между такими R-пиками на ЭКГ в миллисекундах называются N-N-интервалами). Такая продолжительность записи ЭКГ была выбрана для того, чтобы все обследование полностью, начиная с наложения электродов и заканчивая записью ответов, занимало не более 10–12 минут. Регистрация сердечного ритма производилась аппаратно-программным комплексом «Omega-Medicine» (Россия, Санкт-Петербург, «Динамика»).

Этап 1 (фон) – регистрация сердечного ритма в состоянии покоя.

Этап 2 – регистрация сердечного ритма в ходе припоминания ребенком ситуаций поощрения, осуществляемых родителями в семье.

Этап 3 – регистрация сердечного ритма в ходе припоминания ситуаций, связанных с наказанием [3]. Данная процедура исследования позволяла оценить как переход регуляции от спокойного бодрствования к эмоциональному состоянию, так и переход от эмоционального состояния одной валентности к другой.

Результаты и их обсуждение

Как и другие физиологические процессы в организме, вариабельность сердечного ритма регистрируется как временно́й ряд (длины R-R-интервалов), изменения которого имеют сложную закономерность. При этом в рамках вариабельности сердечного ритма есть как периодические процессы, так и нелинейные (хаотические) колебания. Особенностью такой сложной системы является многоразмерность (большое число степеней свободы).

А. Пуанкаре использовал при анализе подобной нелинейной динамики систем метод восстановление траектории всей системы по одномерному массиву данных. Этот метод заключается в изучении геометрического построения двумерного сечения аттракторов (точек притяжения) орбит состояний динамической системы [5].

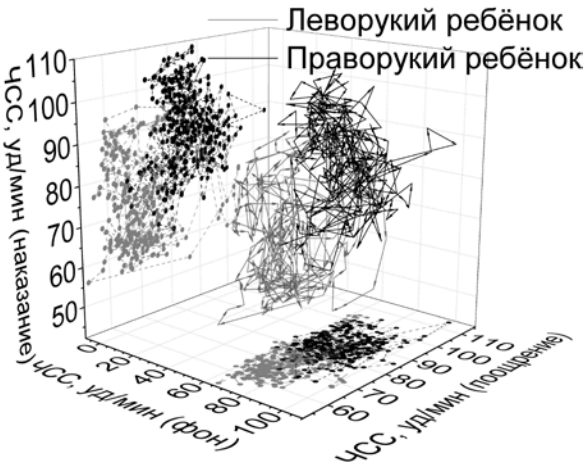
Д. Рюэль и Ф. Такенс [11] предположили, что аттракторы можно изучать с помощью сечения различных размерностей. В 1980 году Н. Паккард с коллегами [10] предположили (и это будет математически доказано [12]), что для восстановления N-мерного аттрактора траектории состояний динамической системы достаточно сечения, в котором в качестве координат могут выступать само значение и производные (первая, вторая и т.д.). Оценку числа измерений аттрактора можно получить разными способами, например методом ложных соседей, или корреляционной размерности [13]. При этом Ф. Такенс [12] предложил метод восстановления аттрактора на основе сечения по «запаздывающим координатам», показал, что он дает надежную оценку топологии, вывел формулу для расчета зависимости размерности сечения от размерности самого изучаемого аттрактора.

Для построения трехмерного сечения по «запаздывающим координатам» Ф. Такенс берет значения изучаемой переменной с запаздыванием: X_n, X_{n+1}, X_{n+2}. Из этих значений образуются группы: (X_1, X_2, X_3), (X_2, X_3, X_4)... и по этим координатам последовательно строится траектория точек в пространстве вложений [4]. Так путем восстановления орбит динамической системы решается (топологически) система дифференциальных уравнений методом конечных разностей. При этом надежные решения можно получить не только по «сдвинутым» значениям одного временно́го ряда, но и по значениям нескольких рядов (осей координат), которые описывают, например, динамическую систему в фазовом пространстве нескольких переменных одновременно. Для визуализации динамики состояний сердечного ритма детей мы использовали последний вариант.

Для анализа вариабельности сердечного ритма используют не только сами траектории [7], но и геометрию облака рассеяния N-N-интервалов (эллипсоид разброса). Например, двумерное облако рассеяния (Poincaré plot) – это плоскость вложения. Если вариабельности нет, то $X_n = X_{n+1}$, эллипс разброса вырождается в диагональ из левого нижнего угла в правый верхний угол, которая носит название «линия соответствия». Сам эллипс разброса описывается полуосями [13]: SD1 – стандартное отклонение короткопериодических вариаций, ось SD1 перпендикулярна линии соответствия; SD2 – стандартное отклонение долгопериодических вариаций, ось SD2 сонаправлена с линией соответствия.

Статистический смысл облака рассеяния в том, что в эллипс разброса с двойными полуосями попадает 95 % точек на графике [6]. При этом если эллипс разброса R-R-интервалов более вытянут по оси SD2, то в этом состоянии сердечный ритм испытуемого более ригиден, если эллипс более вытянут по оси SD1 – более вариабелен.

Траектории состояний сердечного ритма у детей в фазовом пространстве (в оперативном покое, при воспоминании о поощрении и наказании) визуализированы на рисунке.



Траектории состояний сердечного ритма (частоты сердечных сокращений, ЧСС) в фазовом пространстве «оперативный покой» – «припоминание поощрения в семье» – «припоминание наказания в семье» для леворукого и праворукого ребенка.

Можно заметить (рисунок), что сердечный ритм детей в оперативном покое (ось *X*) имеет одинаковый размах: диапазон значений ЧСС – от 55 до 105 уд/мин. Во время припоминания о поощрении в семье (ось *Y*) размах сердечного ритма у леворукого ребенка остается прежним, а у праворукого его нижняя граница меняется: от 65 до 105 уд/мин. Во время припоминания ситуаций наказании (ось *Z*) у обоих детей меняется верхняя граница размаха сердечного ритма: у леворукого от 55 до 95 уд/мин, у праворукого от 65 до 110 уд/мин. В итоге трехмерное облако точек состояний сердечного ритма праворукого ребенка сдвигается относительно облака точек состояний сердечного ритма леворукого ребенка. На этом основании можно предположить, что динамика сердечного ритма у праворукого ребенка при переходе в эмоциональные состояния более выражена, чем у леворукого.

Таким образом, наши данные свидетельствуют, что при припоминании эмоциональной ситуации у леворукого ребенка изменения сердечного ритма находятся в пределах адаптационного ре-

сурса, а у праворукого ребенка, напротив, изменения в регуляции сердечного ритма выходят за пределы адаптационного ресурса.

Статистическая проверка гипотезы, выдвинутой на основе визуализации, показывает (табл.), что у леворуких детей значимых изменений сердечного ритма нет (тенденцию к изменению ЧСС между состояниями припоминания поощрения в семье и в оперативном покое Power analysis на данном количестве испытуемых не подтверждает).

У смешаннoруких детей тенденция к изменению ЧСС между состояниями припоминания поощрения в семье и в оперативном покое превращается в значимое различие. И проявляется новая тенденция – изменение ЧСС между состояниями припоминания наказания в семье и в оперативном покое (Power analysis на данном количестве испытуемых ее не подтверждает).

Для праворуких детей Power analysis подтверждает оба различия от ЧСС в состоянии оперативного покоя: и ЧСС при припоминании поощрения в семье, и ЧСС при припоминании наказания в семье.

Частота сердечных сокращений у детей 7–8 лет с различной ведущей рукой на этапах эксперимента

	«Рукость»		
	Левая	Смешанная	Правая
ЧСС, фон (А)	84,32 ± 20,14	85,69 ± 17,72	87,74 ± 14,64
ЧСС, поощрение (Б)	86,14 ± 20,04	87,53 ± 18,90	91,32 ± 15,26
ЧСС, наказание (В)	85,96 ± 20,96	87,41 ± 17,53	91,76 ± 14,84
W (Б – А)	***p*=0,017***	***p*<0,001***	***p*<0,001***
Power (Б – А)	0,719	**0,914***	**0,995***
W (В – Б)	*p*=0,599	*p*=0,636	*p*=0,285
Power (В – Б)	0,053	0,057	0,096
W (В – А)	*p*=0,123	***p*=0,004***	***p*<0,001***
Power (В – А)	0,328	0,735	**0,992***

Примечания: Число испытуемых: леворуких 35, смешаннoруких 64, праворуких 46.
Формат значений ЧСС [среднее] ± [стандартное отклонение], все статистические критерии двусторонние, $\alpha = 0{,}05$.
Различий между группами детей по среднему значению ЧСС (U Mann-Whitney) и по дисперсии (F Fisher, Moses Test) не обнаружено.
* – значимые уровни (W Wilcoxon $p<0{,}05$; Power ($1-\beta$ err Prob) $\geq 0{,}80$).

Поскольку различия между группами детей нет ни по самому значению ЧСС, ни по величине дисперсии, то можно высказать предположение, что выраженность динамики сердечного ритма у детей 7–8 лет в эмоциональных состояниях различной валентности нарастает в направлении «левая ведущая рука → смешанные ведущие руки → правая ведущая рука».

Описанные выше тенденции (которые Power analysis на данных выборках не подтвердил) будут далее изучаться на выборках бóльших размеров.

Заключение

Мы показали, что нелинейный анализ вариабельности сердечного ритма эффективно выявляет различие в изменениях регуляции сердечного ритма у праворуких и леворуких детей. Более того, уже в 7–8 лет у детей регуляция сердечного ритма при переходе от оперативного покоя к эмоциональному состоянию связана с разными механизмами центральной регуляции.

Литература

1. *Баевский Р.М., Берсенева А.П.* Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М.: Медицина, 1997. 320 с.
2. *Вергунов Е.Г., Николаева Е.И.* Оценка психофизиологической стоимости креативности в междисциплинарных исследованиях // Вестник психофизиологии. 2014. Т. 1. С. 74–82.
3. *Николаева Е.И.* Леворукий ребенок: диагностика, обучение, коррекция. СПб. : Детство-Пресс, 2005. 127 с.
4. *Николаева Е.И., Вергунов Е.Г., Добрин А.В.* Применение инструментов нелинейного анализа в психофизиологических исследованиях на примере описания динамики сердечного ритма леволатеральных детей в эмоциональных состояниях разной валентности [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. URL: www.science-education.ru/120-16974.
5. *Пуанкаре А.* О кривых, определяемых дифференциальными уравнениями. М. : ОГИЗ, 1947. 392 с.
6. *Atkinson G., Nevill A.M.* Statistical Methods for Assessing Measurement Error (Reliability) in Variables Relevant to Sports Medicine // Spórts Med. 1998. V. 26 (4). P. 217–238.
7. *Brennan M., Palaniswami M., Kamen P.* Do existing measures of Poincaré plot geometry reflect nonlinear features of heart rate variability // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2001. V. 48 (11). P. 1342–1347.
8. *Cohen L., Manion L., Morrison K.* Research Methods in Education. N. Y. : Routledge, 2007. 638 p.
9. *Faul F., Erdfelder E., Lang A.G., Buchner A.* G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences // Behav. Res. Methods. 2007. V. 39(2). P. 175–191.
10. *Packard N.H., Crutchfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S.* Geometry from a time series // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. P. 712–716.
11. *Ruelle D., Takens F.* On the nature of turbulence // Communications in Mathematical Physics. 1971. V. 20 (3). P. 167–192.
12. *Takens F.* Detecting strange attractors in turbulence // Lecture Notes in Mathematics. 1981. V. 898. P. 366–381.
13. *Tarvainen M.P., Niskanen J.P., Lipponen J.A., Ranta-Aho P.O., Karjalainen P.A.* Kubios HRV – heart rate variability analysis software // Comput Methods Programs Biomed. 2014. V. 113 (1). P. 210–220.

О моделировании многослойных сетей коннектома – когнитома на примере этанол-зависимой функциональной системы

Ю.В. Никонов

ФГБУЗ МСЧ № 59 ФМБА России, г. Заречный, Пензенская область

Рассматривается возможность моделирования взаимодействия коннектома – когнитома [1] на примере этанол-зависимой функциональной системы (ЭЗФС) [5, 7]. Для моделирования используются формализмы сложных сетей, многослойных сетей [13], квантовой механики [4, 9, 14]. При описании макросистем, психики человека ряд исследователей использует представление о существовании квантовоподобных (англ. quantum like) явлений, процессов в экономике, социологии, психологии, лингвистике. Эти процессы описываются с помощью математического аппарата квантовой механики (уравнения Шредингера, вычисления амплитуды вероятности, энтропии фон Неймана и т.д.), но не являются квантовыми в физическом смысле (важно, что квантовоподобные свойства не исключают наличие иных, классических и неклассических, свойств исследуемых макросистем). В частности, к квантовоподобным явлениям относят некоммутирующие измерения, которые «возмущают» измеряемую систему и меняют ее состояние [4, 14].

Характерные черты квантовоподобного поведения полностью относятся к проведению теста-«измерения» на наличие патологического влечения к алкоголю (ПВА) [3, 5, 7] в динамике становления ремиссии алкогольной зависимости (по МКБ-10: психические расстройства и расстройства поведения, вызванные употреблением алкоголя – F 10.2). По мнению М.Ф. Тимофеева, у больного алкоголизмом формируется ЭЗФС, которая запускается в действие как экзогенными, так и эндогенными рилизинг-факторами (ЭЗФС относится к функциональным системам, по П.К. Анохину). Запах алкоголя является одним из наиболее значимых раздражителей для этой системы. Наличие и интенсивность влечения к алкоголю выявляется рядом опросников, тестом кратковременного (от 2–3 до 20 с) воздействия парами этанола на обонятельный анализатор. М.Ф. Тимофеев [7] выявлял периоды риска рецидива у больных с алкогольной зависимостью на ранних этапах становления ремиссии, используя методику изучения реакции сосудов головного мозга на запах алкоголя среди больных алкоголизмом мужчин (запойная форма, средняя прогредиентность) в возрасте от 30 до 48 лет. Контрольная и основная группы были обследованы методами реоэнцефалографии, самоотчета. На каждой реоэнцефалограмме (РЭГ) записывали фоновую кривую и рассчитывали коэфициент межполушарной асимметрии ($К'_{ас}$), который вычисляется по формуле: $К'_{ас} = (А_б – А_м/А_м) \cdot 100$ %, где $А_б$ – амплитуда реограммы на стороне, где реографический индекс больше, а $А_м$ – амплитуда реограммы на стороне, где реографический индекс меньше. Затем проводили функциональную пробу с запахом алкоголя и вновь записывали РЭГ с расчетом тех же параметров (ежедневно в первые 10 дней и далее через 1–2 дня до 66-го дня ремиссии). Изменения $К'_{ас}$ после функциональной нагрузки фиксировались и сравнивались с показателями при фоновом исследовании в процентах. По основной группе результаты исследования были представлены в виде ($К_{ас}$) – отношения $К'_{ас}$ при функциональной пробе к $К'_{ас}$ при фоновом исследовании (в процентах) в зависимости от времени (дня воздержания от алкоголя). У больных алкогольной зависимостью из контрольной группы $К'_{ас}$ при фоновом исследовании равнялся 0,408 ± ± 0,012. После функциональной пробы с запахом алкоголя он уменьшался до 0,301 ± 0,012 (35,5 %).

В результате «измерения» возможна актуализация ПВА и соответствующее изменение психического и соматического состояния больного. Считается, что ПВА представлено совокупностью многоуровневых компонентов: аффективными, вегетативными, идеаторными и поведенческими. Маловероятны, но возможны и спонтанное, «эндогенное», появление ПВА во время ремиссии, и спонтанное исчезновением ПВА и становление ремиссии алкоголизма [3, 7]. Актуализации ПВА соответствует увеличение коэффициента межполушарной асимметрии, а значит, и неравенства кровоснабжения (и активации соответствующих нейронных сетей ЭЗФС) полушарий головного мозга. Результат проведения «измерения» – пробы с запахом этанола является вероятностным и носит некоммутирующий характер.

Все больше данных, что сложные сети, многослойные сети, в том числе гиперсети, которые моделируются соответственно с помощью графов и гиперграфов, имеют квантовоподобные свойства. К сложным и многослойным сетям относят сети технологические (например, сети автономных систем Интернета), биологические (в том числе нейронные), когнитивные и социальные. Важно, что при помощи гиперграфов моделируют квантовые сети, многочастичную квантовую запутанность [16].

К.В. Анохин выдвинул концепцию существования «скрытой от нашего непосредственного восприятия когнитивной реальности» – когнитома [1, 2]. Признавая важность исследования коннектома, он говорит о тупиковости этого пути, который не решает психофизическую проблему. Когнитом, по К.В. Анохину, полная система субъективного опыта, сформированная у организма в процессе эволюции, развития и познания. Структура когнитома, его динамика, согласно этим взглядам, охватывают всё многообразие менталь-

ных явлений, связанных и с поведением, и с психикой и сознанием. Когнитом представляет собой сложную нейронную сеть, вершинами которой являются дискретные коги («ког» – это когнитивная группа нейронов – COgnitive Group, COG (англ.), активность которой обуславливает данный специфический опыт), а ребрами – связи между ними. Другой смысл термина «ког» – элемент феноменального опыта, в нашем примере – переживания ПВА.

Согласно сформулированной в докладе на XVII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Нейроинформатика-2015» К.В. Анохиным гиперсетевой теории мозга (ГСТМ), формализм гиперсетей обобщает сети и гиперграфы, давая аппарат, необходимый для отображения феноменов эмерджентности в многоуровневых системах, позволяет моделировать гораздо более сложные структуры, чем сети и гиперграфы. В основе свойств модели, предложенной К.В. Анохиным (когнитом – коннектом – гиперсеть), нетривиальные следствия двусторонних отношений сетей коннектома и когнитома. Коги являются вершинами *K*-сети (когнитома), и они же представляют собой подмножества вершин нижележащей *N*-сети (коннектома), объединенные единым когнитивным опытом (в нашей модели ког – ЭЗФС). Ребра между *k*-вершинами в когнитоме формируются как совокупности ребер между образующими их подмножествами *n*-вершин в коннектоме. В понятиях алгебраической топологии ког представляет собой реляционный симплекс, или гиперсимплекс, основанием которого служит симплекс из вершин опорной *N*-сети, одновременно выступающий вершиной с новым качеством в *K*-сети более высокого уровня [2].

Узлам модели на уровне нейронных сетей могут соответствовать как единичные нейроны, так и их сети, т. е. на самом деле речь в этом контексте идет о сетях сетей и сетях сетей сетей. Возможная формализация в такой модели неразрывной связи слоя когнитивной сети (как психического процесса) и слоя нейронной сети на основе геометрии скрытого геометрического пространства [6] – частный случай более адекватной многослойной модели.

Модель К.В. Анохина хорошо вписывается в концепцию «скрытой» гиперболической геометрии сложных сетей [8, 15, 18, 19, 20]. Для описания множества связей нейронов, возникновения новых уровней в многоуровневых системах нейронов мозга человека многие современные исследователи [13] предлагают описывать сложные сети реального мира как многослойные сети, вариантом которых являются гиперсети.

Остановимся подробнее на сложных однослойных сетях. Растущие безмасштабные сложные сети (scale-free networks) могут рассматривать и как подчиняющиеся квантовой статистике Ферми – Дирака (узлы сети образуют дерево Кэли) и как подчиняющиеся статистике Бозе – Эйнштейна (если рассматриваются связи узлов – линки) [11, 15].

Установлено, что иерархической структуре сложных, растущих, безмасштабных сетей соответствует геометрия гиперболических пространств, имеющая скрытую метрику и топологию [8, 15, 18–20]. К таким растущим сетям у взрослого человека относятся нейронные сети «клеток времени» (time cells), сети которых, вероятно, можно рассматривать как элементы коннектома, а вершины как элемент когнитома [6].

Ряд исследователей разрабатывает общий подход к экстраполяции типичных конфигураций модели скрытых переменных для применения к случайным геометрическим графам (*RGG*) [17]. Для *RGG* скрытые переменные совпадают с координатами узлов сложной сети. То есть каждый узел сложной сети может иметь скрытые переменные, которые определяют его координаты в скрытом метрическом (как правило, неевклидовом, гиперболическом пространстве). Расстояние (а именно, *гиперболическое* расстояние) между двумя узлами в этом пространстве определяется вероятностью их связи (учитывая временную природу нейронных сетей [6, 18], возможно измерение этого расстояния и в интервалах времени).

Группа авторов (с участием Дж. Бьянкони) разработала модель, в которой на основе двух сетевых параметров состоящая из симплексов – треугольников – растущая геометрическая сеть порождает сложную искривленную нетривиальную геометрию. В пределе эта модель может генерировать как безмасштабные сети с гиперболической геометрией с постоянной и переменной кривизной, так и сети с евклидовой метрикой [12].

Важнейший механизм роста сложных сетей – преимущественное присоединение (preferential attachment) – предлагается моделировать с помощью геометрии гиперграфов [10]. То есть скрытую геометрию когнитивной группы нейронов можно представить и как «просто» сложную сеть с гиперболическими свойствами, и как гиперграфическую конструкцию, что соответствует ГСТМ. Причем, как сложная сеть, ког может обладать и квантовоподобными свойствами [11, 14].

К.В. Анохин предполагает, что разум человека – это многоуровневая структура: сеть сетей нейрональных сетей; сознание – это «траффик» в этой структуре. Траффик подразумевает движение информации по путям-траекториям, имеющим метрику. Важно, что эта метрика – метрика гиперболического пространства и нейронные сети когов в модели обладают гиперболическими свойствами.

Дж. Бьянкони доказывает [11], что в растущих составных (multiplex и super-multiplex networks) сетях симметрии многослойных структур (в том числе двуслойных сетей) могут быть описаны как сочетание квантовых статистик Бозе – Эйнштейна и Ферми – Дирака. Мультиплексные сети представляет собой многослойную систему, образованную из *N* узлов, имеющих копию-реплику в каждом из слоев *M*, а *M*-слои образуют различные сети взаимодействий между узлами *N*. Супермультиплексы формируется из слоев, представляющих

безмасштабные сети, и могут отображаться формализмом бозе-эйнштейновской конденсации линков. Каждый слой супермультиплекса интерпретируется как чистое квантовое двухчастичное состояние, имеющее характеризующую его энтропию запутывания. Бьянкони вывела простое соотношение (но не тождество) между энтропией запутанности отдельных состояний сети и уровнем энтропии всей сети, которое объединяет классическую динамику растущих неравновесных сетей с квантовыми статическими характеристиками чистых состояний сети.

Предположим, что такая двуслойная, дуплексная, сеть с узлами-репликами – основа для модели взаимодействия соответствующих узлов нейронных сетей полушарий головного мозга (каждый узел левого полушария имеет копию-реплику в правом полушарии). Допустим, что сочетание квантовых статистик Бозе – Эйнштейна и Ферми – Дирака, по Бьянкони, описывают не только рост, но и активацию нейронов функциональных систем, узлы которых расположены в обоих полушариях головного мозга. Пример – активация нейронов ЭЗФС в стадии ремиссии алкогольной зависимости под воздействием запаха этанола [7].

То есть нейроны ЭЗФС можно описать как когнитивную нейронную группу (ког), причем вершина этого кога – узел многослойной когнитивной гиперсети «приобретает имя». «Имя» соответствует когнитивной информации, несомой данным когом (здесь – идеаторные и аффективные компоненты ПВА). Количество узлов нейронной сети ЭЗФС не растет в прямом смысле этого слова, но последовательная активация уже имеющихся нейронов головного мозга в модели описывается как растущая сеть. Считается, что основой внутреннего единства психической и физической «зависимости» является доминанта, которая представляет собой разветвленную многоэтажную систему с интеллектуальным, эмоциональным, вегетативно-сосудистым, эндокринным, висцеральным и другими компонентами и уровнями [3].

Энтропия супермультиплексной сети H (X) как растущей сети имеет логарифмическую зависимость от времени (T). Узлы в модели присоединяются к сети в случайном порядке с вероятностью $1/T$, где T – номер узла в сети:

$$H(X) = \log(t), \quad (1)$$

$$H(X) = S^{[1]} + S^{[2]} + 2h(\alpha), \quad (2)$$

где

$$h(\alpha) = -\alpha \log(\alpha) - (1-\alpha)\log(1-\alpha),$$

$$S^{[1]} = -Tr_a \rho^{[1]} \log \rho^{[1]}, \quad (3)$$

$$S^{[2]} = -Tr_a \rho^{[2]} \log \rho^{[2]}.$$

Таким образом, запутанность энтропии дуплексной сети интерпретируется как совокупность двух квантовых двухчастичных состояний сети, которые связаны с уровнем энтропии супермультиплексной сети и могут описываться как классический неравновесный процесс. Связь между энтропией $H(X)$ и энтропией запутанности двух слоев $S^{[1]}$ и $S^{[2]}$ остается в силе для каждого значения α, принадлежащего множеству [0, 1), а также при переходе в фазу конденсации [10]. Тогда в предлагаемой модели уровень вершины кога (здесь уровень идеаторных и аффективных компонентов ПВА), части когнитивной гиперсети, моделируется с помощью квантовых двухчастичных состояний (основы квантовых вычислений). То есть ЭЗФС, свойства которой можно наблюдать как проявления ПВА, в предлагаемой модели рассматривается как часть когнитивной гиперсети, обладающая квантовоподобными свойствами. Наблюдение ПВА в этом контексте – аналог ситуации кота Шредингера [4]. До момента проведения измерения (пробы с парами алкоголя) возможны три варианта: 1) ПВА есть (кот жив); 2) ПВА нет (кот мертв); 3) состояние суперпозиции: ПВА есть и ПВА нет (кот ни жив, ни мертв).

В квантовой информатике два двухчастичных состояния – это два запутанных кубита, способные к простейшим вычислениям. А многослойная конструкция Бьянкони с $M >> 2$ может обладать свойствами квантового компьютера. В свою очередь, уровню квантовых вычислений, уровню квантовой запутанности соответствует нетривиальная скрытая топология.

В статье сделана попытка моделирования взаимоотношений элементов коннектома-когнитома (точнее, кога как нейронной сети и кога как элемента феноменального опыта) на примере динамики ПВА в структуре ЭЗФС на основе:

1) использования для моделирования растущих безмасштабных сложных сетей коннектома и когнитома формализма Ферми – Дирака и соответствующей скрытой гиперболической геометрии, формализма гиперграфов, квантовоподобных свойств сложных сетей;

2) использования описанной Джинестрой Бьянкони «суперсимметрии» многослойных растущих составных сетей (в том числе двуслойных сетей), которые могут быть описаны как сочетание квантовых статистик Бозе – Эйнштейна и Ферми – Дирака.

Делается попытка применения выведенного Дж. Бьянкони соотношения между энтропией запутанности отдельных состояний дуплексной сети (как модели межполушарного взаимодействия нейронных сетей) и уровнем энтропии всей сети, которое объединяет классическую динамику растущих неравновесных сетей (в модели – активации нейронных сетей функциональных систем как когнитивных групп нейронов обоих полушарий головного мозга) с квантовыми (квантовоподобными) характеристиками чистых запутанных состояний двуслойной сети (в модели – уровень когнитивной гиперсети, «вершин когов») как основы квантовых вычислений и динамики информации в когнитивных гиперсетях.

Литература

1. *Анохин К.В.* Когнитом: в поисках единой теории для когнитивной науки // Шестая международная конференция по когнитивной науке : Тезисы конференции. Калининград, 2014. С. 26–27.

2. *Анохин К.В.* Когнитом: гиперсетевая теория мозга // XVII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием : сборник научных трудов. Ч. 1. М., 2015. С. 14–16.

3. *Антропов Ю.А. и др.* Некоторые аспекты патологического (зависимого) влечения при алкоголизме // Вопросы наркологии. 2014. № 1. С. 121–132.

4. *Данилов В.И.* Моделирование некоммутирующих измерений // Журнал новой экономической ассоциации. 2009. № 1/2. С. 10–36.

5. *Никонов Ю.В.* Структура и динамика этанол-зависимой функциональной системы на ранних этапах становления ремиссии алкогольной зависимости в виде двудольной нейронной сети // Труды III Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». Н. Новгород, 2013. С. 106–108.

6. *Никонов Ю.В.* О моделировании меток времени в контексте межполушарной симметрии // Асимметрия. 2014. Т. 8, № 3. С. 37–46.

7. *Тимофеев М.Ф.* Периоды риска у больных алкоголизмом на ранних этапах ремиссии и противорецидивная иглотерапия // Вопросы наркологии. 1992. № 1. С. 35–38.

8. *Albert R. et al.* Topological implications of negative curvature for biological and social networks // Phys. Rev. E. 2014. V. 89 (3). P. 032811.

9. *Asano M. et al.* Quantum Information Biology: from information interpretation of quantum mechanics to applications in molecular biology and cognitive psychology [Электронный ресурс]. 2015. URL: arXiv:1503.02515.

10. *Avin Ch. et al.* Random Preferential Attachment Hypergraphs [Электронный ресурс]. 2015. URL: arXiv: 1502.02401v1.

11. *Bianconi G.* Supersymmetric multiplex networks described by coupled Bose and Fermi statistics // Phys. Rev. E. 2015. V. 91. P. 012810.

12. *Bianconi G. et al.* Complex Quantum Network Geometries: Evolution and Phase Transitions [Электронный ресурс]. 2015. URL: arXiv:1503.04739v1.

13. *Boccaletti S. et al.* The structure and dynamics of multilayer networks // Physics Reports. 2014. V. 544, is. 1. P. 1–122.

14. *Khrennikov A.* Ubiquitous Quantum Structure: from Psychology to Finances. Springer, 2010. 210 p.

15. *Krioukov D. et al.* Hyperbolic Geometry of Complex Networks // Phys. Rev. E. 2010. V. 82. P. 36106.

16. *Lyons D. et al.* Local unitary symmetries of hypergraph states [Электронный ресурс]. 2014. URL: arXiv: 1410.3904v1.

17. *Ostilli M., Bianconi G.* Statistical Mechanics of Random Geometric Graphs. Geometry-induced first order phase transition [Электронный ресурс]. 2014. URL: arXiv: 1412.0756.

18. *Ni Ch.-Ch. et al.* Ricci Curvature of the Internet Topology [Электронный ресурс]. 2015. URL: arXiv: 1501.04138v1.

19. *Papadopoulos F. et al.* Replaying the Geometric Growth of Complex Networks and Application to the AS Internet // ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. 2012. V 40, № 3. P. 104–106.

20. *Zuev K. et al.* Emergence of Soft Communities from Geometric Preferential Attachment [Электронный ресурс]. 2015. URL: arXiv:1501.06835v1.

Исследование механизмов переходных процессов от режимов нормальной обработки сигналов к режимам эпилептиформной активности

И.В. Нуйдель, М.Е. Соколов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Введение

Общеизвестно, что человек и животные обрабатывают информацию различных модальностей: звуковые, зрительные, тактильные внешние стимулы. В нормальном режиме обработки информации поведение, двигательные, мыслительные, психические и другие функции адекватны внешней ситуации. При регистрации электроэнцефалографических сигналов мозга в нормальном режиме (при обработке информации) колебания электрической активности в отделах мозга асинхронные и низкоамплитудные.

При эпилепсии с разной этиологией или органическими изменениями в мозге процесс восприятия информации нарушается. Во время припадка происходит нарушение двигательных, вегетативных, мыслительных, психических функций.

Еще в 1912 году П.Ю. Кауфман в работе «Электрические явления в коре головного мозга» впервые описал ЭЭГ во время судорожного приступа. Он выдвинул гипотезу, согласно которой судорожный припадок проявляется ненормальной волновой активностью в ЭЭГ.

Существует более 40 видов эпилепсий различной этиологии. Основной чертой всех видов припадков считается параксизмальная синхронизованная спонтанная электрическая активность нейронов, наблюдаемая на ЭЭГ.

Наиболее распространенные типы первично генерализированных приступов, отличающихся вовлечением в патологический процесс обоих полушарий мозга, – тонико-клонические (судорожные приступы) и абсансы.

Абсансная эпилепсия представляет собой одну из форм неконвульсивной генерализованной эпилепсии. Интерес ученых именно к этому заболеванию обусловлен отсутствием точных методик предсказания начала приступа и спорами о механизмах его формирования. Этот вид эпилепсии широко распространен среди детей и характеризуется внезапной кратковременной (до 10 секунд) остановкой деятельности ребенка (игры, разговор), ребенок замирает, не реагирует на оклик, а через несколько секунд продолжает прерванную деятельность. Пациенты не осознают и не помнят припадков. Частота абсансов может достигать нескольких десятков в сутки.

Основным признаком абсансной эпилепсии является спонтанное возникновение в ЭЭГ генерализованных высокоамплитудных разрядов пик – волна. Исследование механизмов возникновения, поддержания и окончания статуса абсансной эпилепсии – важная задача нейрофизиологии.

Свойства и механизмы разрядов пик – волна были подробно исследованы в экспериментах на животных с генетической абсансной эпилепсией (линии крыс GAERS и WAG/Rij [1–4]. Разряд пик – волна представляет собой результат ритмической пароксизмальной таламо-кортикальной активности. Каждый разряд начинается в сомато-сенсорной области коры ("hot spot" [5]) и поддерживается благодаря работе пейсмекера, расположенного в ретикулярном ядре таламуса [6]. В результате сложных реципрокных таламо-кортикальных взаимодействий формируются характерные высокоамплитудные разряды [6].

Хотя эпилепсия сейчас активно исследуется, идет поиск лекарственных препаратов, актуальными остаются понимание схем и связей между нейрональными модулями, отвечающими за эпилептиформную активность. Это и является темой исследования настоящей работы.

Модель

В настоящее время активно разрабатываются функциональные модели (симуляторы) нейронных сетей, архитектура которых основана на особенностях структуры и принципах работы реальных нейронов и нейрональных модулей как крупных элементах структурно-функциональной организации мозга [7]. Исследование динамики работы таких систем на моделях, несомненно, приведет к пониманию процессов обработки информации в мозге.

Известно, что важную роль в процессах обработки информации играют взаимосвязанные нейрональные модули: кора, ретикулярные ядра таламуса, специфический таламус. Поэтому очень важно выяснить, как преобразуется входной сигнал в этих отделах мозга и какие внутренние процессы могут ограничить и полностью нарушить их совместную работу. Одним из вариантов таких нарушений является эпилепсия.

В работе приведены результаты расчетов на функциональной модели взаимодействия нейрональных модулей в процессе обработки информации в таламо-кортикальной системе.

Архитектуру настоящей модели определяют взаимодействующие звенья таламо-кортикальной цепи. Структура одного нейронного модуля состоит из ансамблей пирамидальных нейронов, тормозных интернейронов коры, нейронов специфических таламических ядер (специфические ядра, VPM) и тормозных нейронов ретикулярного ядра таламуса (неспецифические ядра, nRT), связанных между собой (рис. 1). Знаками «+» и «–» показаны возбудительные и тормозные связи соответственно. Стрелка в нижней части рисунка – сенсорный вход в таламус.

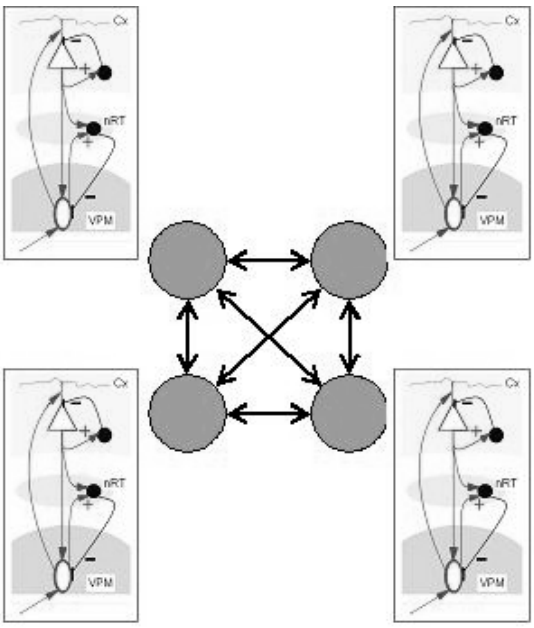


Рис. 1. Схема взаимодействия четырех однотипных модулей

В модель включены четыре однотипных взаимосвязанных нейронных модуля. В модели нейронные ансамбли коры одного модуля воздействуют на нейронные ансамбли коры других модулей. Состояние модуля описывается четырьмя переменными, определяющими распределение возбуждения в соответствующих нейронных ансамблях: U1 – переменная, соответствующая активности сенсорных (релейных) ядер таламуса; U2 – переменная, соответствующая активности нейронов коры; U3 – переменная, соответствующая активности тормозных интернейронов коры; U4 – переменная, соответствующая активности ретикулярных ядер таламуса.

В нормальных условиях функционирования в системе происходит следующее: в модельную систему приходит внешний сигнал на отделы таламуса модельных модулей, через таламус внешний сигнал поступает в различные ансамбли пирамидальных клеток коры. В работах И.А. Шевелева [8] было высказано предположение, что сигнал с таламуса приходит в разные участки коры (отвечающие за выделение разных признаков) со сдвигом фазы, вызванным временной задержкой. Этот сдвиг фазы обуславливает асинхронную работу в клетках коры в процессе обработки информации.

Происходит следующая последовательность: внешний сигнал активирует специфические (сенсорные, или релейные) ядра таламуса (VPM), по таламо-кортикальному пути возбуждение поступает на ансамбль пирамид коры (переменная U2), пирамиды коры связаны с тормозными интернейронами (переменная U3), сенсорные, или релейные, ядра таламуса (VPM, U1) и кора (U2) активируют ретикулярные ядра таламуса (nRT). nRT (переменная U4) оказывает тормозное влияние на релейные ядра таламуса (U1), сигнал больше не поступает на кору и деактивируется nRT. Затем процесс повторяется. В результате после прохождения входного сигнала через нейронные ансамбли таламо-кортикальной системы на нейронных ансамблях коры формируется прерывистое, стробированное представление исходного сигнала [6, 7, 9].

Как известно из нейрофизиологических данных, пароксизмальная активность нейронов обуславливается синхронизацией электрической активности нейронных ансамблей в различных модулях и отражается на электроэнцефалограмме повышением частоты и амплитуды колебаний. Нервный субстрат остается неизменным, но система переходит в режим автоколебаний, чем обусловлено нарушение процесса восприятия. Для эпилепсии характерно возникновение в коре и подкорковых структурах пик-волновых разрядов широко генерализованной спонтанной высокоамплитудной активности [1–4, 6].

Постановка эксперимента

В работе приведены результаты последних расчетов на функциональной модели взаимодействия нейрональных модулей при обработке информации в таламо-кортикальной системе.

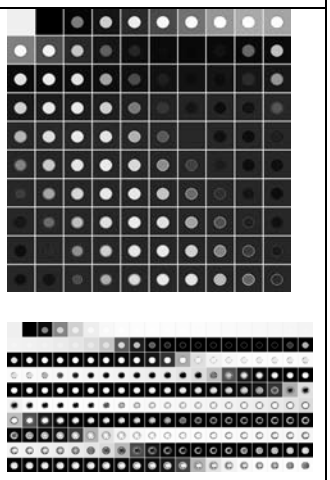
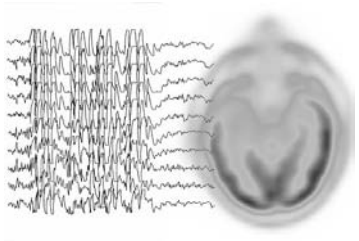
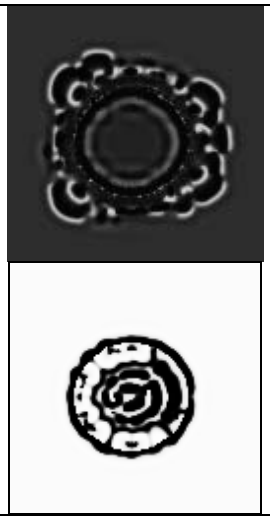
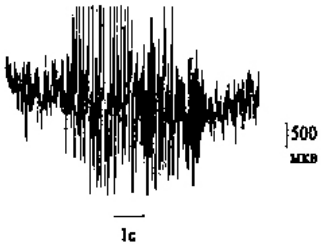
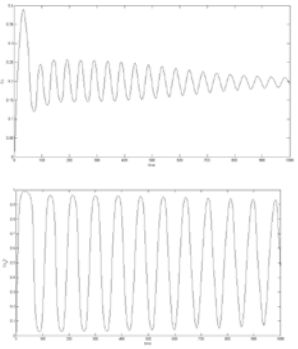
Модель программно реализована в среде MATLAB 7.7.0.

После проведения расчетов имеются набор пространственно-временных паттернов (изображений) для переменных модели, соответствующих таламусу, коре, ретикулярным ядрам таламуса, а также интегральная (суммарная) активность нейронных ансамблей четырех модулей коры от времени – одномерный сигнал, аналог электроэнцефалограммы, снятой с участка коры. Интегральная активность нейронных ансамблей учитывает эти характеристики переменных коры с четырех теламо-кортикальных модулей (кортикальных колонок) и показывает, как меняется во времени общий уровень возбуждения в модельной коре.

В численном эксперименте для одного модуля это нормированная на площадь суммарная яркость точек на изображении, соответствующем переменной коры, изменяющаяся во времени в процессе выделения из внешнего сигнала различных признаков (объектов заданного размера, линий заданного направления и т.п.).

Параметры модулей: функции пространственной связи для переменной, соответствующей коре, имеют различный размер (матрицы коэффициентов связей между элементами 11*11, 9*9, 7*7, 5*5) и настроены на выделение линий разной толщины.

В качестве исходного стимула на переменную, соответствующую таламусу, подавался сигнал в виде изображения (белый круг на черном фоне), постоянный и периодический. Постоянный – для иллюстрации собственного процесса стробирования внешнего сигнала самой системой. Периодический – для рассмотрения перехода к самовозбуждению системы периодическим сигналом (известный факт из исследования эпилепсий).

Факты и наблюдения	Характеристика эпилепсии	Вычислительный эксперимент	Результаты расчетов
	Нарушение процесса восприятия информации. Поведенческие появления	В режиме несинхронной работы модулей происходит периодическое (стробированное) выделение контура исходного сигнала. Далее, с увеличением коэффициента связи между модулями, происходит их синхронизация, и выделение признака исходного изображения нарушается	
	Абсансная эпилепсия представляет собой одну из форм неконвульсивной генерализованной эпилепсии. Области повышенной импульсной активности распространяются по коре	Распространение областей активности с увеличением коэффициента синхронизации между модулями	
	Возникновение в ЭЭГ генерализованных высокоамплитудных разрядов пик – волна	Синхронизация модулей, определенно, является причиной повышения амплитуды сигнала	

Результаты расчетов

1. Постоянный внешний сигнал в виде изображения (белый круг на черном фоне).

Нет синхронизации между модулями. Коэффициент синхронизации (КС) малый (0,001–0,01).

Переходные режимы начинаются при слабой синхронизации (КС = 0,02).

Усиливается синхронизация между модулями при значении КС 0,04–0,1.

Режим нормального стробирования сигнала нарушается, на переменной, соответствующей коре, наблюдается распространение областей активности (таблица).

2. Подается внешний сигнал с условным периодом (Т) 100.

Наблюдаются следующие состояния:

Модули рассинхронизованы КС = 0,01, Т = 100.

Модули синхронизуются КС 0,02–0,1.

Режим нормального стробирования сигнала также нарушается, на переменной, соответствующей коре, наблюдается распространение областей активности (таблица).

Выводы и перспективы

Данные о распространении областей повышенной импульсной активности при эпилепсии удалось воспроизвести на функциональной моде-

ли, которая позволяет рассматривать собственные динамические режимы и как примеры преобразования сенсорных информационных сигналов (изображений).

Исследуемая функциональная модель с многообразием динамических режимов дает новый взгляд на нормальную обработку информации и ее нарушения (примером которых является абсансная эпилепсия).

В работе [10] рассматривается явление перемежаемости в поведении таламо-кортикальных осцилляторных паттернов на ЭЭГ крыс с предрасположенностью к абсанс-эпилепсии. Этот процесс также можно смоделировать, если управлять коэффициентом синхронизации (рис. 2). Осталось выявить, что им управляет. В модельных расчетах он задается как параметр.

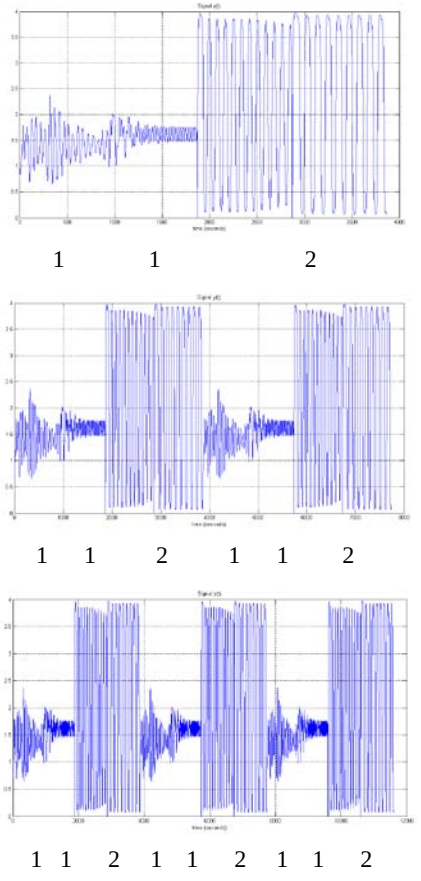


Рис. 2. Одномерный модельный сигнал. По оси абсцисс – время в шагах счета, по оси ординат – нормированная на площадь суммарная яркость точек на изображении, соответствующем переменной коры. Сигнал содержит фрагменты, соответствующие разным процессам обработки информации (1 – стробирование внешнего сигнала с выделением контура, 2 – распространение областей повышенной активности

Авторы выражают глубокую признательность В.Г. Яхно за обсуждение и продвижение результатов работы на всех ее этапах.

Работа поддержана грантом РНФ 14-11-00693 «Теория информационных процессов в мозге: нейросетевые математические модели сигнализации, обработки информации, информационных и когнитивных функций», конкурс 2014 года «Проведение фундаментальных научных исследований отдельными научными группами», программами президиума РАН «Фундаментальные науки в медицине» и «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики».

Литература

1. *Vergnes M., Marescaux C. et al.* Spontaneous paroxysmal electroclinical patterns in rat: a model of generalized non-convulsive epilepsy // Neurosci. Lett. 1982. V. 33. P. 97–101.

2. *Coenen A., van Luijtelaar G.* Genetic animal models for absence epilepsy: a review of the WAG/Rij strain of rats // Behav. Genetics. 2003. V. 33. P. 635–655.

3. *Depaolis A., van Luijtelaar G.* Genetic models of absence epilepsy in the rat // Pitkanen A., Schwartzkroin P., Moshe S. (Eds) Models of Seizures and Epilepsy. San Diego, CA : Elsevier, 2005. P. 233–248.

4. *van Luijtelaar G., Sitnikova E.* Global and focal aspects of absence epilepsy: the contribution of genetic models // Neurosci. A. Biobehav. Rev. 2006. V. 30. P. 983–1003.

5. *Meeren H., Pijn J., van Luijtelaar G., Coenen A., Lopes da Silva A.* Evolving concepts on the pathophysiology of absence seizures: the cortical focus theory // Arch. Neurology. 2002. V. 62. P. 371–376.

6. *Кузнецова Г.Д., Габова А.В., Соколов М.Е.* Исследование механизмов поддержания и окончания статуса абсансной эпилепсии // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2011 : труды конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2011. С. 107–109.

7. *Яхно В.Г.* Модели нейроноподобных систем. Динамические режимы преобразования информации // Нелинейные волны' 2002. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2003. С. 90–114.

8. *Шевелёв И.А.* Волновые процессы в зрительной коре мозга // Природа. 2001. № 12. URL: http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/NATURE/12_01/ALPHA.HTM.

9. *Hecht-Nielsen R.* A theory of the cerebral cortex // Proceedings of the 6th International Conference on Molecular Electronics and Biocomputing / Future Electronic Devices Association of Japan. Okinawa, 28–30 November 1995.

10. *Грубов В.В., Храмов А.Е., Короновский А.А., Ситникова Е.Ю.* Перемежаемость в поведении таламокортикальных осцилляторных паттернов на ЭЭГ крыс с предрасположенностью к абсанс-эпилепсии // Настоящий сборник. С. 68–70.

Вызванная ритмическая активность мозга человека в условиях сенсорной маскировки

М.А. Павловская, Е.К. Айдаркин

Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Ростов-на-Дону

Известно, что исследования мозговой активности имеют основополагающее значение для изучения нейро- и психофизиологических механизмов восприятия, познания и поведения человека и животных. Электрическая активность головного мозга исследуется достаточно давно, но многие фундаментальные аспекты взаимодействия ритмов головного мозга, в частности их функциональное значение, были неясны. На протяжении многих лет исследования ЭЭГ при усовершенствовании методов и методик накопили множество свидетельств о том, что модуляция амплитуды колебаний в мозге происходит последовательно в отношении конкретных познавательных задач.

Как известно, нейронные колебания мозга на различных частотах образуют иерархию скоординированной деятельности, циклическим образом модулируя когнитивные процессы [1], увеличивая или подавляя обнаружение внешних раздражителей [2]. Предъявление стимула приводит к запуску осцилляторной мозговой активности популяции нейронов и ее синхронизации или десинхронизации. Прекращение стимуляции приводит к затуханию колебаний. Частота и периодичность суперпозиции ритмов зависит от уровня бодрствования, произвольного и непроизвольного внимания, значимости и модальности стимулов [3]. Предположительно, одним из механизмов работы мозга является фазово-амплитудная координация ритмов, которая заключается в том, что фаза низкочастотных колебаний модулирует амплитуду более высокочастотных осцилляций в иерархическом порядке. Это происходит в обоих гиппокампах [4] и неокортексе [5], что позволяет обрабатывать и передавать информацию по иерархии частотного диапазона [6]. 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 [7] или взаимосвязи ритмов [8].

Следовательно, мозговые колебания могут способствовать обработке информации в мозге человека различными способами, создавая гибкую динамичную систему, работающую по принципу суперпозиции /синергичности или мультиплексирования [9; 10].

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 центральной маскировки.

В тестировании с добровольным письменным согласием приняли участие 34 студента 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 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 фильтрации для получения ритмических колебаний, соответствующих основным компонентам ССП, 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.

Результаты исследования показали, что сокращение маскировочного интервала и вероятности целевого стимула приводит к росту времени различения целевых стимулов независимо от модальности и порядка следования целевого и маскирующего стимулов. Использование процедуры разномодальной стимуляции привело к сокращению времени распознавания стимулов по сравнению с одномодальной стимуляцией.

Следовательно, скорость различения целевых стимулов по показателям времени реакции зависит от межмаскировочного интервала, модальности, вероятности предъявления целевых стимулов и порядка следования маскера и целевого стимула.

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 различения 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 (рис. 1) 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.

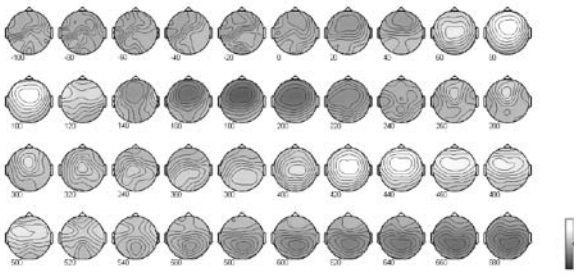


Рис. 1. Изопотенциальная карта компонентов ССП в условиях обратной слуховой маскировки (белым цветом показана негативность, черным – позитивность)

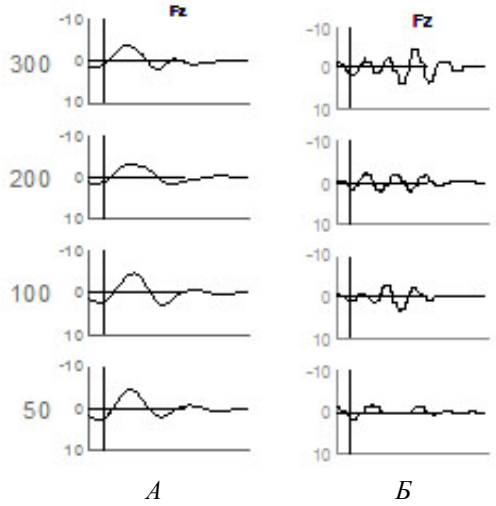
Стадия обнаружения стимула представлена негативностью во фронтальной области для слухового анализа и в париетальной – для зрительного. Различение стимулов сопровождается развитием двух негативных фокусов: в верхневисочных для слухового и нижнезатылочных областях для зрительного стимула. Оба фокуса находятся 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 развитию позитивной волны в лобной (*P*3а) и теменной (*P*3б) областях сагиттально, обеспечивающих деактивацию двух систем внимания.

Далее было изучено взаимодействие фронтальной системы, проявляющейся в активации симметричных процессов негативно-позитивных тета-колебаний (*N*1, *P*2, *N*2, *P*3а) ССП, и париетальной, отражающейся в процессах развития дельта-колебаний (*CNV*, *MMN*, *P*3б) 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.

Наблюдается формирование двух фокусов позитивности на стадии завершения СМИ в лобно-центральной (*P*3а) и теменной (*P*3б) областях, расположенных саггитально. Лобная волна, преобладающая в условиях зрительной стимуляции в тета-диапазоне, вероятно, притормаживала процессы, связанные с произвольным контролем со стороны таламо-фронтальной системы. Теменная позитивность, выраженная лучше при слуховом восприятии, развивалась в дельта-диапазоне (1–2 Гц), что, скорее всего, соответствовало процессам деактивации таламо-париетальной системы.

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.



А *Б*

Рис. 2. Вызванная дельта- (*А*) и тета-активность (*Б*) ССП в условиях обратной слуховой маскировки в отведении *Fz* при сокращении межмаскировочных интервалов (указаны слева)

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. 2, *А*) и снижением тета-ритма (рис. 2, *Б*) ССП, охватывающего волну ожидания, компоненты негативности рассогласования и компонент *P*3б, независимо от модальности и порядка следования стимула. Сокращение вероятности приводит к росту выраженности дельта-волны ССП.

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.

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, процедура маскировки связана с взаимодействием таламо-фронтальной, проявляющейся в симметричных процессах развития тета-колебаний ССП (*N*1, *P*2, *N*2, *P*3а), и таламо-париетальной, отражающейся в процессах развития дельта-колебаний ССП и контролирующей волну ожидания, негативность рассогласования и компонент *P*3б, систем внимания. В условиях обратной маскировки маскер воздействовал, в первую очередь, на тета-колебания ССП, снижая эффективность деятельности таламо-фронтальной 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.

Показана перспективность использования маскировочной парадигмы в качестве коррекционной процедуры воздействия на функциональное состояние оператора в ходе рабочей смены, а также для оценки степени его сенсорной помехоустойчивости.

Литература

1. *Thut G., Miniussi C., Gross J.* The Functional Importance of Rhythmic Minireview Activity in the Brain // Current Biology. 2012. V. 22. P. 658–663.

2. *Schroeder C.E., Lakatos P.* Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection // Trends Neurosci. 2009. V. 32(1). P. 9–18.

3. *Pavlovskaya M.A.* Physiological Mechanisms of Intermodal Interactions in the Sensory Masking // Int. J. Psychophysiology. 2014. V. 94, is. 2. P. 205.

4. *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.

5. *Lakatos P., Shah A.S., Knuth K.H., Ulbert I., Karmos G., Schroeder C.E.* An oscillatory hierarchy controlling neuronal excitability and stimulus processing in the auditory cortex // J. Neurophysiol. 2005. V. 94. P. 1904–1911.

6. *Calderone 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.

7. *Panzeri S., Brunel N., Logothetis N.K., Kayser C.* Sensoryneural codes using multiplexed temporal scales // Trends Neurosci. 2010. V. 33. P. 111–120.

8. *Fries P.* A mechanism for cognitive dynamics: neuronal communication through neuronal coherence // Trends Cogn. Sci. 2005. V. 9. P. 474–480.

9. *Basar E.* A review of alpha activity in integrative brain function: Fundamental physiology, sensory coding, cognition and pathology // Int. J. Psychophysiology. 2012. V. 86. P. 1–24.

10. *Harmony T.* The functional significance of delta oscillations in cognitive processing // Frontiers in Integrative Neuroscience. 2013. V. 7. P. 1–10.

Трехкомпонентная теория механизмов стресса

С.Б. Парин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Нижегородская государственная медицинская академия

Введение

Настоящая лекция преследует несколько целей. Во-первых, это обсуждение принципиально важного общего вопроса, насколько незыблемыми являются принятые в науке теории и представления и насколько необходимым и допустимым является процесс их развития. В том числе мы коснемся проблемы адекватного использования терминов для описания исследуемых процессов и явлений. Во-вторых, будет предложено новое видение такой, казалось бы, устоявшейся и общепринятой концепции, как теория стресса Ганса Селье. В-третьих, будут обобщены накопленные на сегодняшний день данные о функциях одной из главнейших регуляторных систем организма – эндогенной опиоидной системы (ЭОС) – и об ее участии в развитии стресса. В-четвертых, мы кратко коснемся современных методов измерения стресса. И, наконец, будет предпринята попытка согласовать современные знания о стрессе с положениями методологически наиболее перспективного направления когнитивной науки – системной психофизиологии.

О пьедесталах, монументах и вольной терминологии

Одной из важнейших особенностей науки является преемственность знаний, объединенных в теоретические конструкции. В этой преемственности – сила науки, но и ее слабость. Сила – в стабильности поступательного процесса познания. Слабость – в опасности окостенения концептуальных положений, что превращает теорию в вознесенный на пьедестал монумент самой себе. К сожалению, мы знаем множество трагических примеров подобного бронзовения. Самые вопиющие: рефлекторная теория И.П. Павлова и социальная концепция К. Маркса. В обоих случаях весьма плодотворные для своего времени и прогностически эффективные теоретические конструкты усилиями многочисленных последователей были доведены до полного абсурда и намертво законсервированы. Огромная армия начетников стояла на страже своих кормушек, вполне вольно перетолковывая (и выхолащивая) суть концепций, но с чрезвычайной бдительностью отстаивая форму. Эту трагическую сторону процесса познания, возможно, уместнее было бы рассматривать в отдельной работе, если бы она напрямую не затрагивала тему лекции.

Гениальная, без преувеличения, теория стресса, сформулированная Гансом Селье в интервале между Первой и Второй мировыми войнами [1], по существу, оказалась к концу XX века в том же положении неприкасаемого монумента, что чуть было не привело в итоге к ее полному краху. Незыблемость формальных положений при перманентном расширении граничных условий применения концепции стресса поставила под угрозу саму теорию. Это еще одна опасность, свойственная процессу познания: размывание целостной теории до ее полного исчезновения. К сожалению, сам творец теории стресса невольно приложил руку к возникновению этой проблемы. В самом деле, если «ранний Селье» [1] достаточно жестко определял стресс как неспецифическую реакцию организма на повреждение, в своих поздних работах [2, 3] он существенно смягчил позицию, абсолютно справедливо характеризуя стресс как реакцию не только на повреждение, но и на его угрозу. Кроме того, пытаясь объяснить место стресса в системе жизнеобеспечения, он отмечал [3], что в любом вполне специфическом процессе в организме всегда присутствует неспецифический компонент (как в потенциале действия всегда присутствует локальный ответ). Именно эта его невинная фраза привела к катастрофическим и одновременно абсурдным последствиям: во многих современных статьях, монографиях и учебниках стресс (со ссылкой на Селье (!?)) определяется как неспецифическая реакция организма на любое воздействие. Что называется, приехали… Если речь идет о любом воздействии, то стресс мы испытываем непрерывно, и днем, и ночью. И вся жизнь есть стресс (прекрасный слоган для распространителей транквилизаторов!). И непонятно, как это мы до сих пор живы, учитывая чрезвычайную энергозатратность и разрушительность стресса. И вообще, совершенно очевидно, что изучать стресс бессмысленно, потому что есть масса наук, изучающих жизнь как таковую, и масса теорий на этот счет, и рождение еще одной ни к чему хорошему не приведет.

К сожалению, великий мыслитель, сумевший распознать целое за массой частностей, допустил еще одну, казалось бы, совсем уж невинную лингвистическую вольность: Г. Селье, находясь под обаянием блестящих работ Уолтера Кеннона, охарактеризовал стресс как адаптивную реакцию («общий адаптационный синдром») [4]. Мы вернемся к последствиям этой оговорки, однако здесь рискнем спрогнозировать, что этот пример незначительного, как будто, терминологического промаха со временем войдет в учебники, и далеко не только физиологические.

Теория стресса: пора обновления

Хочется надеяться, что предыдущие разделы лекции подвели читателя к восприятию тех нов-

шеств, внесение которых в классическую теорию стресса требуют новые знания, полученные на новом витке исследовательских технологий.

Думается, начать нужно с современного определения понятия «стресс». По нашему мнению, *стресс – это неспецифический, защитный, стадийный, системный, редуцированный психофизиологический ответ на повреждение или его угрозу.* Эта позиция не есть результат абстрактных размышлений, это – интеграция многочисленных экспериментально проверенных фактов (как автора, так и множества его предшественников и последователей). Здесь каждый из терминов имеет вполне фиксированную коннотацию, и потеря каждого из них грозит возобновлением процесса размывания самого понятия стресс. Постараемся это кратко обосновать.

1) Стресс – ответ *на повреждение.* Этот тезис не требует особого обоснования. Достаточно вспомнить «триаду Селье»: грубые структурные нарушения (гипертрофия надпочечников, инволюция тимуса и язвообразование в желудочно-кишечном тракте), которые с большой вероятностью возникают в ответ на болезнь, травму, контузию, отравление и т.д.

2) Стресс может возникать и в ответ *на угрозу повреждения*. Это принципиально важно, потому что вносит ясность в вопрос о том, зачем в стрессе задействована лимбическая система, отвечающая, прежде всего, за эмоции, т. е. взвешивание, оценку информации.

3) Стресс, безусловно, является *неспецифическим* ответом на повреждение или его угрозу. Это еще один принципиально важный тезис, в котором невозможно не согласиться с Г. Селье. Факторы, провоцирующие развитие стресса, могут иметь самую разную природу (физические, химические, информационные и др.), однако сам стресс будет развиваться по принципиально однотипному сценарию. Все попытки разделить стресс на физиологический, психический, информационный, эмоциональный и др. только размывают само понятие стресса.

4) Стресс – это *защитный* процесс. Данное положение нашей концепции принципиально противоречит представлению Г. Селье о стрессе как адаптационной реакции. В самом деле, русский перевод понятия адаптации очевиден: это приспособление или привыкание. Адаптация предполагает вполне определенные функциональные изменения в организме, направленные на приспособление к изменившимся условиям среды. Например, мы адаптируемся к понижению окружающей температуры через непроизвольную пилоэрекцию («гусиная кожа» – прощальный подарок от наших чрезвычайно мохнатых предков), мышечный термогенез (дрожь – попеременное сокращение и, что наиболее важно, расслабление мускулатуры, ведь каждое расслабление мышц сопровождается выделением тепла) и централизацию кровообращения (благодаря этому мы меньше обогреваем Вселенную и больше – себя любимых). С другой стороны, на повышение температуры мы отвечаем активацией кожных потовых желез, т. е. реализуем один из классических вариантов кондиционера, ведь на испарение соленой жидкости с нашей поверхности тратится наша тепловая энергия. И к той, и к другой проблеме можно адаптироваться еще и поведенчески, соответственно увеличив или уменьшив количество одежды. В любом случае, речь идет о сугубо приспособительных функциональных механизмах. А теперь представьте себе ситуацию, в которой кто-то или что-то наносит вам повреждение или даже угрожает вашей жизни. Может ли человек или другое животное в здравом уме и доброй памяти приспособиться к этому или, того краше, привыкнуть?! Очевидно, что здесь требуется иной подход. И такой подход есть. Это защита, т. е. противодействие повреждающему фактору. Защитные механизмы существенно грубее адаптационных, они предполагают минимизацию процессов управления, отключение избыточной информации о внешних условиях и, в конечном счете выполнение стандартных, как правило генетически детерминированных, операций. Защита вынужденно жестока: ради спасения целого (жизни) она реализует «механизм жертвы», который проявляется в структурных (а не только функциональных!) перестройках. Достаточно вновь вспомнить «триаду Селье» и многочисленные «болезни стресса», чтобы убедиться в очевидности принадлежности стресса именно к защитным, а не к адаптационным процессам.

5) Стресс, как справедливо утверждал Г. Селье, является *стадийным* процессом. Он развивается поэтапно. Первая стадия – тревоги – характеризуется резким, но кратковременным (секунды, минуты) психомоторным возбуждением, при котором физические возможности субъекта внезапно превышают кажущийся предел. Вторая стадия – резистентности – может продолжаться часы и даже сутки и проявляется в упорном сопротивлении повреждающему фактору. Третью стадию – истощения – Г. Селье определял как полный упадок сил, связанный с растратой энергетических ресурсов. Интересно, что длиться этот упадок сил может неделями, месяцами и даже годами (хронический стресс). Согласно нашей концепции, это тоже управляемый процесс, в котором организм закономерно переходит от активных форм защиты в глухую оборону с минимизацией энергозатрат.

6) Стресс – *системный* процесс. Эта позиция имеет двойной смысл. С одной стороны, в стресс вовлечены все системы организма. В соответствии с «принципом жертвы» потери несут все органы и системы: иммунная (здесь не только инволюция тимуса, но и невирусные формы СПИДа), эндокринная (гипертрофия надпочечников – это только вершина айсберга, ведь стресс может привести к множеству гормональных сбоев; диабет – один из самых серьезных), пищеварительная (язвы желудка и тонкого кишечника – вечные спутники стресса, и это нимало не противоречит их инфекционной этиологии), сердечно-сосудистая (стенокардия и гипертония прямо связаны с периодическими стрессами) и мн. др. Но у положения о систем-

ности стресса есть и другой, возможно, более важный смысл. Очень сложная, многогранная и сбалансированная система регуляции функций в оптимальных (или близких к ним) условиях при стрессе сменяется вопиющим доминированием трех регуляторных систем. Первые две были детально изучены при Г. Селье и самим Г. Селье. Это симпатоадреналовая система (САС), обеспечивающая героические проявления первой стадии стресса, и гипоталамо-гипофизарно-адреналовая система (ГГАС), с активностью которой связано устойчивое сопротивление, характерное для второй стадии. Третья система была открыта еще в последние годы жизни Г. Селье, но не попала в поле зрения великого мыслителя. Это эндогенная опиоидная система (ЭОС), которая включает в себя обширную группу опиоидных пептидов (эндорфинов, энкефалинов, динорфинов и др. – около 50 гормонов и медиаторов) и 3 типа опиатных рецепторов – белковых сайтов на мембране клеток (не только нейронов!), специфически связывающих опиоидные пептиды и сродственные (но не родственные!) им фармакологические препараты опиатного ряда (морфин, героин, пентазоцин и другие наркотические анальгетики). ЭОС – древнейшая, судя по современным данным, из регуляторных систем организма, появившаяся не позже первых клеточных форм жизни на Земле и сохранившая архаические способы регуляции, которые направлены на минимизацию любых взаимодействий с внешней средой. Хорошо известно, что древние, наиболее примитивные механизмы защиты выражаются в инкапсулировании субъекта от негативных воздействий (различного рода цисты, споры и другие пассивно-оборонительные приспособления). Именно этот механизм, как показали наши многолетние исследования, и реализует ЭОС уже на новом витке эволюции в информационном пространстве, прерывая сигналы о рассогласовании между планируемыми (предсказанными) и реальными параметрами гомеостаза. И именно эта система участвует во всех трех стадиях развития стресса, и именно она ответственна за реализацию третьей стадии стресса – истощение. Только это не энергетическое истощение, как полагал Г. Селье, а своего рода информационная аутоблокада, направленная на энергосбережение и возможность действовать не в консенсусе со средой, а вопреки ей.

7) Исходя из предыдущих положений, нетрудно обосновать тезис о сугубой *редуцированности* стресса как процесса. Действительно, при стрессе не только резко сужается сфера управления функциями, упрощаясь до полного доминирования трех стресс-реактивных систем: САС, ГГАС и ЭОС. Не менее выраженным становится и обеднение исполнительных функций: как показали наши многолетние исследования (выполненные совместно с большим коллективом нейробиологов, биофизиков, психофизиологов, медиков, физиков и математиков – здесь прежде всего необходимо отметить сотрудничество с профессорами С.А. Полевой и Е.В. Голановым), при стрессе (и его экстремальном варианте – шоке) возникает стандартизация и в сенсорной, и в моторной, и в вегетативной сферах. При стрессе все мы становимся чрезвычайно похожими друг на друга, и это закономерно, потому что мы автоматически скатываемся на древний, примитивный уровень функционирования.

8) Наконец, стресс – это, безусловно, *психофизиологический* процесс, в котором неразрывно объединены физиологические и психологические механизмы. При этом нужно подчеркнуть, что более слабым звеном в нашем понимании сущности стресса является именно его психологический компонент. Главным достижением в этой области является введённое более полувека назад Р. Лазарусом [5, 6] понятие копинга как базовой стратегии выхода из экстремальной ситуации. В зачаточном состоянии находится изучение когнитивной составляющей стресса: сегодня мы сумели сделать только первые, хотя и обнадеживающие, шаги в этом направлении. Однако не подлежит сомнению, что появление новых методов психологических исследований позволит значительно продвинуться в этой области.

Измерение стресса

Тезисный формат публикации не позволяет подробно остановиться на проблеме пополнения методических ресурсов изучения стресса в естественном контексте деятельности. Хорошо известные биохимические, электрофизиологические и психологические способы определения этого экстремального состояния имеют ряд общеизвестных недостатков. Например, измерение уровня адреналина, норадреналина, АКТГ, кортиколиберина, тиролиберина, соматостатина и т.д. возможно только в лабораторных условиях и, как правило, в экспериментах на животных. Измерение уровня кортизола в слюне возможно в процессе естественной деятельности, но неизбежно меняет контекст этой деятельности и, кроме того, позволяет говорить о наличии/отсутствии стресса, но не о моменте его начала. Использование ЭЭГ или, тем более, фМРТ несовместимо с естественной деятельностью. Психологические тесты и опросники апеллируют к уже прошлому субъективному опыту и катастрофически малоинформативны. В этом аспекте хотелось бы обратить особое внимание на нашу недавнюю разработку, уже прошедшую процедуру патентования [7]. Благодаря использованию авторских способов обработки данных, нам удалось создать мобильную телеметрическую систему мониторинга функционального состояния человека в контексте его естественной деятельности, которая позволяет по расчетным показателям вариабельности сердечного ритма с точностью до нескольких секунд определять момент начала первой фазы стресса. Эта новая технология существенно расширяет возможности изучения механизмов стресса в естественной среде обитания. Кроме того, она позволяет эффективно контролировать функциональное состояние человека-опе-

ратора, что в современной техногенной среде должно способствовать снижению вероятности разрушительного вмешательства пресловутого «человеческого фактора» в работу сложных систем.

Дискуссионная проблема: стресс – активность или реактивность?

Наконец, хотелось бы обратить особое внимание на принципиально важный вопрос: я в своем изложении по возможности настойчиво избегал общепринятого во всей мировой литературе определения стресса как реакции. С одной стороны, с позиции повседневной бытовой логики не вызывает сомнений тот факт, что стресс является реакцией, ответом на вполне конкретные внешние угрозы. С другой стороны, на сегодняшнем уровне психофизиологических знаний стало очевидным, что при рассмотрении процессов в живых системах через призму реакционных, рефлекторных подходов мы утрачиваем возможность понимания глубинных механизмов формирования собственной активности этих систем. В этом плане чрезвычайно перспективным представляется переосмысление самой сущности стресса как редуцированной «первобытной» функциональной системы, в которой пусковым стимулом (релизером) является взвешенный относительно ситуативного контекста (обстановочной афферентации) сигнал об угрозе повреждения, доминирующей мотивацией – минимизация повреждения, а эталонным результатом действия (АРД) – устранение (от) источника угрозы. Характерно, что программа действия при стрессе предельно стандартизирована, что подчеркивает ее врожденную, генетически детерминированную природу. Автор в полной мере отдает себе отчет в эскизности своего последнего тезиса и надеется на жесткую и плодотворную дискуссию.

Работа выполнена при частичном финансировании по гранту РФФИ № 14-06-00390_а и гранту РГНФ № 15-06-10894_а.

Литература

1. *Selye H.* A syndrome produced by diverse nocuous agents // Nature. 1936. V. 138. P. 32.

2. *Selye H.* The Physiology and Pathology of Exposure to Stress. Montreal : Acta Inc., 1950.

3. *Selye H.* Stress and disease // Science. 1955. V. 122. P. 625–631.

4. *Selye H.* The general adaptation syndrome and the diseases of adaptation // J. Clin. Endocrinol. Metab. 1946. V. 6. P. 117–230.

5. *Lazarus R.S.* Coping theory and research: Past, present, and future // Psychosomat. Med. 1993. V. 55. P. 234–247.

6. *Lazarus R.S., Launier R.* Transaktionen zwischen Person und Umwelt // Stress: Theorien, Untersuchungen, Massnahmen / R. Nitsch (Hrsg.). Bern : Huber, 1981. S. 213–259.

7. Способ определения стресса : пат. РФ RU 2531443, 2014 / Некрасова М.М., Полевая С.А., Парин С.Б., Шишалов И.С., Бахчина А.В.

Фразеологизмы: теоретические представления *vs.* корпусные исследования

И.С. Парина

Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова

В докладе на материале русского, немецкого и английского языков рассматриваются фразеологизмы – устойчивые и воспроизводимые сочетания слов с полностью или частично переосмысленным значением и структурой словосочетания или предложения [1, 2].

Интерес к фразеологизмам выходит далеко за рамки собственно лингвистических исследований. Еще в начале XX века в Германии [3] и США [4] были разработаны тесты для диагностики психических заболеваний с заданиями на толкование пословиц. Сейчас тесты на объяснение пословиц используются для определения уровня интеллекта [5, 6, 7], когнитивных способностей при черепно-мозговой травме [8], алкоголизме [9], а также при диагностике шизофрении [10, 11]. В отечественной психиатрии использовать пословицы для клинической диагностики впервые предложила Б.В. Зейгарник [12]. Разработанные ею тесты применяются до сих пор [13, 14].

Психодиагностические «пословичные» тесты содержат задания трех основных типов: на толкование пословиц в контексте и вне контекста, на сравнение пословиц – выявление синонимов и антонимов – и на соотнесение пословиц с фразами в прямом значении [13].

Предполагается, что при выполнении этих заданий испытуемому следует абстрагироваться от буквальных значений компонентов пословицы и от ситуации, которая в ней заложена. Если же испытуемый концентрируется на значении отдельных компонентов, например объясняет пословицу «Куй железо, пока горячо» как «если железо холодное, оно не мягкое, его нельзя ковать», то это свидетельствует о нарушениях мышления – снижении уровня обобщения [15].

Однако это утверждение не в полной мере соответствует тому, как на самом деле употребляются фразеологизмы в речи. На основе анализа контекстов из Национального корпуса русского языка нами [16] было показано, что, если в классической литературе XIX – начала XX века пословицы (наиболее часто встречающиеся в русскоязычных клинических тестах) преимущественно употребляются в переносном значении, то для современной прессы и художественной литературы более характерны контексты языковой игры, в которых происходит обращение к прямому значению компонентов пословицы. Таким образом, при употреблении пословиц авторы высказываний оперируют не только абстрактным значением, но и конкретным – на уровне отдельных компонентов. Более того, пословица включается в контекст именно для создания эффекта языковой игры – т. е. конкретное значение оказывается важнее абстрактного.

Как говорится, ***цыплят по осени считают****, вернее, в волейбольном чемпионате –* ***по весне*** (Советский спорт. 2007.01.09).

Если я прав, а я редко ошибаюсь, ***не в свои сани*** *ты метишь.* ***Переедут полозьями****, и следа не останется* (П. Галицкий. Цена Шагала (2000).

То, что при восприятии фразеологизмов в тексте читающие обращаются к прямым значениям компонентов, подтверждают и психолингвистические эксперименты [17].

Кроме того, предлагаемые в рамках клинических тестов задания на выведение абстрактного значения пословиц (в том числе незнакомых – например, буквально переведенных с иностранного языка) из заложенного в них образа противоречат лингвистическому взгляду на природу пословиц. Согласно лингвистическому определению, приводившемуся выше, пословицы, как и все фразеологизмы, представляют собой языковые единицы с переосмысленным значением – следовательно, значение целого не выводится из значений компонентов – даже путем абстрагирования. Пословицам присваивается определенное значение в языковой общности. Иными словами, часто используемая в тестах пословица «Куй железо, пока горячо» теоретически могла бы означать не только то, что всё нужно делать вовремя. Можно было бы абстрагироваться от заложенного в ней конкретного образа иначе и приписать ей, например, значение «даже устойчивый объект, будучи должным образом подготовленным, поддается воздействию (на основе представления о том, что даже твердое железо можно будет ковать, если его как следует разогреть)» или «работа с каждым объектом требует определенных условий (от конкретного: чтобы ковать железо, его нужно разогреть)».

Итак, значение пословиц не является очевидным и фактически заучивается, а тест на определение значений пословиц оказывается в конечном счете тестом на знание языка.

В возможности разного толкования одного и того же образа можно убедиться, рассмотрев, как употребляются фразеологизмы, имеющие сходное значение и сходную образную основу, в нескольких языках. Забегая вперед, заметим, что фразеологизмы разных языков достаточно редко являются абсолютными эквивалентами, полностью идентичными по значению и употреблению [18].

В качестве примера можно привести немецкую пословицу *Der Apfel fällt nicht weit vom Stamm* и ее русскоязычное соответствие *Яблоко от яблони недалеко падает*. Проанализировав случаи употребления пословицы в Национальном корпусе русского языка, можно убедиться, что она содержит однозначную отрицательную оценку:

Они такие же хулиганы, как и я в молодости. Порой я возмущаюсь их поведением, а потом себя вспоминаю… Права народная мудрость: ***яблоко от яблони недалеко падает*** (Труд-7, 2007.08.23).

Однако для немецкой пословицы в Мангеймском корпусе встречаются примеры, в которых пословица выражает положительную оценку:

Ganz besonders stolz blickte da natürlich der Papa aufs Siegespodest – Triathlon-Urgestein Pepi Ramberger, der all seine Erfahrung einfließen ließ und seine Tochter optimal auf den Wettkampf vorbereitete. ***Der Apfel fällt halt nicht weit vom Stamm*** (Niederösterreichische Nachrichten, 07.07.2008). *С особой гордостью смотрел на пьедестал почета великий триатлонист Пепи Рамбергер, ведь он, используя весь свой опыт, прекрасно подготовил дочь к соревнованиям.* ***И она достойно продолжила его дело*** *(букв. «****Яблоко от яблони недалеко падает****») (перевод мой – И.П.).*

Таким образом, рассмотренные пословицы, несмотря на сходство образной основы и актуального значения, не являются полными эквивалентами.

Еще один пример того, как фразеологизмы, имеющие сходное актуальное значение и образную основу (и, более того, происходящие из одного источника), воспринимаются в различных языковых общностях «под разным углом» – некоторые фразеологизмы библейского происхождения.

Так, в работе [19] нами была изучена пословица библейского происхождения *Легче верблюду пройти сквозь игольное ушко, нежели богатому войти в Царство Божие* (Евангелие от Матфея, гл. 19, ст. 24; Евангелие от Луки, гл. 18, ст. 25), а также аналогичное английское изречение *It is easier for a camel to go through the eye of a needle than for a rich man to enter the kingdom of God* и немецкое *Eher geht ein Kamel durch ein Nadelöhr, als ein Reicher in den Himmel.*

Выводы об их употреблении делались на основе Национального корпуса русского языка, Британского национального корпуса и корпуса Института немецкого языка в г. Мангейм.

В ходе исследования было показано, что в текстах Британского национального корпуса изречение преимущественно употребляется как цитата из Евангелия, а в корпусах немецкого и русского языков оно часто используется для создания эффекта языковой игры. Сохраняется только его первая часть – *легче верблюду пройти сквозь игольное ушко,* – а вместо второй части следует указание на то или иное событие, которое автор считает практически невозможным (и которое как бы сравнивается с первой частью пословицы по степени вероятности):

Легче верблюду пройти сквозь игольное ушко*, чем журналисту – через КПП части, проверяемой бесчисленными комиссиями* (Комсомольская правда, 2007.02.20).

Doch wahrscheinlich ***geht*** *wirklich* ***früher ein Kamel durchs Nadelöhr****, als ein eingefleischter Automobilist zu Fuß* (Kleine Zeitung, 23.09.2000). *Но, похоже, действительно,* ***легче верблюду пройти сквозь игольное ушко****, чем убежденному автомобилисту стать пешеходом (перевод мой – И.П.).*

Кроме того, была выявлена одна особенность, характерная исключительно для русскоязычных контекстов: пословица сокращается до фразеологизма *лезть в игольное ушко*, обозначающего действие, которое трудно совершить. Интересно то, что, если в случаях языковой игры с пословицей, где полностью сохраняется ее первая часть, речь идет о едва ли преодолимом препятствии, в данном случае фразеологизм характеризует действие, с трудом, но все-таки выполненное:

Не зря же отдельные наши скромники все ***лезут в игольное ушко****, с трудом урывают две-три минуты, чтоб выпить у злющей старухи кофе* (Зорин Л. Глас народа (2007–2008) // Знамя. 2008).

В корпусах английского и немецкого языков подобных контекстов найдено не было – если они и возможны, то, по-видимому, не типичны.

Таким образом, даже фразеологические интернационализмы не являются полностью идентичными и допускают разные толкования.

На фоне этого наблюдения представляется спорным достаточно распространенное утверждение о том, что во фразеологизмах отражается душа и культура народа (ср., например, характерное замечание В.Н. Телии о том, что фразеологизмы сохраняют и транслируют культурно-значимые установки и таким образом способствуют формированию культурного самосознания личности и культурно-национальной идентичности всего народа [20]).

Очевидно, что подобные утверждения справедливы лишь в отношении части фразеологизмов. Однако они приводят к появлению культурологических комментариев, подобных следующему комментарию к фразеологизму *ни рыба ни мясо*, данному во фразеологическом словаре [21] и не соответствующему, на наш взгляд, внутренней форме этого фразеологизма:

Ни рыба ни мясо: …Образ фразеологизма отображает представление о рыбе и мясе как о продуктах, которые в русской кухне значительно различаются по своим вкусовым и прочим качествам и которые практически невозможно перепутать…

В то же время в словаре М.И. Михельсона находим объяснение этимологии этого фразеологизма – он является калькой с немецкого *weder Fisch noch Fleisch*, который, в свою очередь, возник во время Реформации. Те, кто не хотел открыто демонстрировать свою религиозную принадлежность, не высказывал определенно, ел ли он скоромное (мясо), как реформаты, или только постное (рыбу), как католики [22].

В словаре В. Кёрте указано, что фразеологизм в немецком появился до Реформации – в XII веке, но наибольшее распространение действительно получил в период Реформации [23].

Так или иначе, этот фразеологизм не может считаться отражением русских национальных ценностей (что, конечно же, не ставит под сомнение существование фразеологизмов, их отражающих). В то же время фразеологизм *ни рыба ни мясо* в русском языке все же обладает определенной спецификой – на уровне лингвистическом, а не культурном.

Так, сравнение контекстов с фразеологизмом *ни рыба ни мясо* и его традиционными словарными соответствиями в английском – *neither fish nor fowl* – и немецком – *weder Fisch noch Fleisch* – в Национальном корпусе русского языка, Британском национальном корпусе, Корпусе современного американского английского и Мангеймском корпусе немецкого языка показало, что они различаются по своей сочетаемости.

В русско- и англоязычных контекстах фразеологизм преимущественно употребляется для характеристики человека.

*А свой судья… **Ни рыба ни мясо**, пустышка. Если американские судьи ставят российским лыжникам больше, чем наш, – как это называется?* (Комсомольская правда. 2002.02.20).

*From a social standpoint – essentially the only standpoint that mattered to her at the time, since she was just a week shy of nineteen – she was **neither fish nor fowl**.* (Miller B., Lael L. High country bride. 2002). *С общественной точки зрения – а для нее, когда ей вот-вот должно было исполниться девятнадцать, только эта точка зрения и была важна – она была **ни рыба ни мясо** (перевод мой – И.П.).*

Для немецкоязычных контекстов более типично употребление фразеологизма с неодушевленными объектами: для характеристики идей и планов, манеры игры спортивных команд, а также погоды.

***Weder Fisch noch Fleisch,** so könnte man das Aprilwetter, das dies Jahr wieder seinem Namen alle Ehre macht, beschreiben* (Rhein-Zeitung. 24.04.2001). *Ни то ни сё (букв. «**Ни рыба ни мясо**») – так можно описать в этом году апрельскую погоду – на этот раз, действительно, типичную (перевод мой – И.П.).*

*Ich möchte in der Bildung mit den Halbherzigkeiten Schluss machen. In Deutschland macht man entweder nach 12 oder 13 Jahren sein Abitur, in Rheinland-Pfalz aber nach 12,5 Jahren. Das ist **weder Fisch noch Fleisch*** (Rhein-Zeitung. 03.03.2006). *Я хочу покончить с образованием, основанным на полумерах. В Германии для получения аттестата зрелости нужно учиться или 12, или 13 лет, а в федеральной земле Рейнланд-Пфальц 12 с половиной. Это ни то ни сё (букв. «**Ни рыба ни мясо**») (перевод мой – И.П.).*

Выявляемая с помощью корпусного анализа специфика употребления близких по значению фразеологизмов в разных языках важна в первую очередь с точки зрения лексикографии. Однако корпусные исследования, позволяющие оценить употребление фразеологизмов на основе большого количества аутентичных контекстов, могут стать основанием для обоснованного пересмотра некоторых представлений о фразеологизмах в лингвистике и за ее пределами.

Литература

1. *Брандес М.П.* Стилистика немецкого языка. М. : Высшая школа, 1983. 271 с.

2. *Lüger H.-H.* Satzwertige Phraseologismen: Eine pragmalinguistische Untersuchung. Wien : Ed. Praesens, 1999. 313 s.

3. *Bleuler E.* Dementia praecox oder die Gruppe der Schizophrenien. Leipzig : Deuticke, 1911.

4. *Kent G.H., Rosanoff A.J.* A study of associations in insanity // Am. J. Insanity. 1910. V. 67. P. 37–96.

5. *Wechsler D.* Manual for the Wechsler Adult Intelligence Scale. N. Y. : Psychological Corporation, 1955.

6. *Delis D.C., Kramer J.H., Kaplan E.* The California proverbs test. Lexington, MA : Boston Neuropsychological Foundation, 1984.

7. *Nippold M.A., Martin S.A., Erskine B.J.* Proverb comprehension in context: A developmental study with children and adolescents // J. Speech and Hearing Research. 1988. V. 31. P. 19–28.

8. *Moran C.A., Nippold M.A., Gillon G.T.* Working memory and proverb comprehension in adolescents with traumatic brain injury: A preliminary investigation // Brain Injury. 2006. V. 20(4). P. 417–423.

9. *Артемьева М.С., Цивилько М.А., Карева М.А., Брюхин А.Е.* Особенности познавательной деятельности у больных с корсаковским синдромом при алкоголизме // Клиническая психология : материалы Первой Международной конференции памяти Б.В. Зейгарник. М. : МГУ, 2001. С. 29.

10. *Gorham D.R.* A proverbs test for clinical and experimental use // Psychological Reports. 1956. V. 2, P. 1–12.

11. *Strub R.L., Black W.F.* The mental status examination in neurology. Philadelphia : F.A. Davis Company, 1977.

12. *Зейгарник Б.В.* К проблеме понимания переносного смысла слов или предложений при патологических изменениях мышления // Новое в учении об апраксии, агнозии и афазии. М., 1934.

13. *Блейхер В.М., Крук И.В., Боков С.Н.* Клиническая патопсихология : руководство для врачей и клинических психологов. Воронеж : МОДЭК, 2002.

14. *Рубинштейн С.Я.* Экспериментальные методики патопсихологии. Приложение. М. : ЭКСМО-Пресс, 1999.

15. *Зейгарник Б.В.* Психология личности: норма и патология. Воронеж : МОДЭК, 1998.

16. *Parina I.* Sprichwörter im Dienst der Psychiatrie und im Sprachgebrauch // Phraseologie und Kultur. Akten der Internationalen Konferenz Europhras 2012. Maribor : Slavistično društvo, Filozofska fakulteta [Zora], 2014. S. 257–265.

17. *Turner N.E., Katz A.N.* The Availability of Conventional and of Literal Meaning During the Comprehension of Proverbs // Pragmatics and Cognition. 1997. V. 5(2). P. 199–233.

18. *Баранов А.Н., Добровольский Д.О.* Аспекты теории фразеологии. М. : Знак, 2008. 656 с.

19. *Парина И.С.* Межъязыковые различия в употреблении фразеологизмов (на примере библеизмов в русском, английском и немецком языках) // Английский язык на гуманитарных факультетах : теория и практика : сборник научных и научно-методических трудов. М. : МАКС Пресс, 2012. С. 65–72.

20. *Телия В.Н.* Первоочередные задачи и методологические проблемы исследования фразеологического состава языка в контексте культуры // Фразеология в контексте культуры. М. : Языки русской культуры, 1999. С. 13–24.

21. Большой фразеологический словарь русского языка. М. : АСТ-Пресс, 2006.

22. *Михельсон М.И.* Русская мысль и речь. Свое и чужое. Опыт русской фразеологии : сборник образных слов и иносказаний. СПб. : Тип. Акад. наук, 1896–1912.

23. *Körte W.* Die Sprichwörter und sprichwörtlichen Redensarten der Deutschen. Leipzig : Brockhaus, 1837. 567 s.

Моделирование динамики информационных образов в социуме методом коммуникативного поля

А.Ю. Петухов, С.А. Полевая

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Естественно-научные аспекты влияния информационных факторов окружающей среды на живые системы еще слабо изучены. Проблема же описания информационно-коммуникативных взаимодействий человек – человек является фундаментальной для современной когнитивной науки. Относительно недавно появились уникальные естественно-научные модели передачи информации от индивида к индивиду [1–3]. Развитием предложенных подходов может быть создание моделей, описывающих информационное взаимодействие в социуме, т.е. при множестве индивидов. Такие модели существенно расширят возможности в прогнозировании реальных социальных и политических процессов. Соответственно, одной из поставленных авторами при написании данной работы задач стало создание модели, способной быть относительно легко масштабированной, т.е. способной отражать не только взаимодействие индивид – индивид, но и взаимодействие при $N > 2$ индивидов.

В основу нашей модели легло представление об описании информационного взаимодействия людей как процесса взаимодействия созданных ими информационных образов (далее – ИО). Информационные образы, или отображения объектов и событий в пространстве признаков, мы рассматриваем как элементарный объект любой виртуальной среды. Человек благодаря непосредственному индивидуальному опыту и познанию является обладателем индивидуального пространства информационных образов со специфической топологией и граничными условиями. Таким образом, в субъективном мире человека могут на равных существовать энграммы реальных событий и энграммы информационных образов, полученных из внешних источников. В случае, когда мозг теряет информацию о природе источника информационного образа (реальный или виртуальный образ), наблюдается феномен «фальшивой памяти» [4].

Материальной основой субъективного пространства ИО (субъективного виртуального пространства) являются специфические паттерны активности в нейронных сетях мозга конкретного человека. Эти нейронные коды уникальны постольку, поскольку уникальны геном, жизненный опыт каждого индивидуума и событийный контекст, соответствующий моменту формирования субъективного ИО [5, 6].

Человек не способен передать образ, который существует у него в голове, в его пространстве ИО, другому человеку напрямую. Для этого он пользуется различными коммуникативными аппаратами. Это может быть речевой аппарат, визуальный, символьный и т.д. Но суть в том, что образ переводится в некоторый код посредством внутреннего шифратора человек (который задается языком, культурой, религией и т.д.) и передается другому человеку. Последний пускает данный код на расшифровку в свой внутренний дешифратор (аналогично), и полученный результат полностью совпасть с исходным практически не имеет шансов, однако при общем указанном языковом, культурном и т.д. базисе несовпадение будет относительно незначительным, и между людьми возникнет информационный канал с относительно небольшими аберрациями. Необходимо также определить механизм генерации информационных образов (ИО).

Упрощенно схему генерации информационных образов в человеческом мозге можно отобразить так (рис. 1):

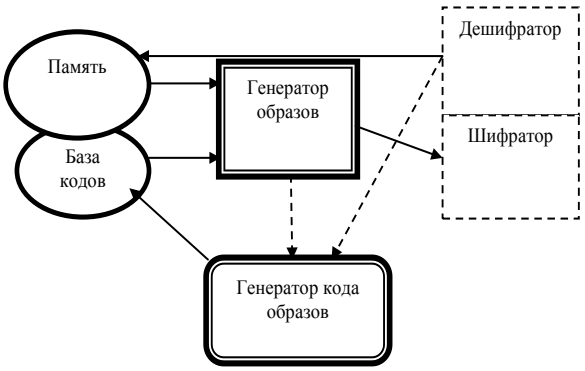


Рис. 1. Условная схема генерации информационных образов в человеческом мозге

Существует условный генератор образов, составляющий образ из элементов реальной и виртуальный памяти (т.е. ИО может быть составлен и из воспоминаний о событиях, которых не было, воображаемых элементов, так называемой фальшивой памяти). Важно уточнить, что для генератора, фактически, нет принципиальной разницы, реальная или виртуальная память использована для образа, если последняя имеется, она будет восприниматься генератором как равноценная.

Последовательность, форма ИО определяется его кодом, который генерируется генератором кода образа и хранится в памяти. Наиболее активно генератор кода образов работает в детском и подростковом возрасте, когда человек составляет представление о мире и накапливает первичные знаниям. При столкновении же с неизвестными в более взрослом возрасте, как правило, человек пытается сопоставить всё с уже известными образами, ищет аналогии и только при отсутствии или серьезной несочетаемости ИО и реального опыта дает команду на создание нового кода и нового образа.

Таким образом, код образа можно определить как последовательность, набор значений, определенного порядка признаков, определяющих расположение элементов реальной и виртуальной памяти.

Собранный образ поступает в пространство ИО, откуда человек его может использовать в своих коммуникативных взаимодействиях, предварительно пропустив через свой шифратор.

Очевидно, что не все образы являются одинаково активными. Часть образов определяет человеческий образ жизни, его коммуникативные привычки и привязанность, часть же вовсе практически не участвует в реальной жизни, включаясь лишь в каких-либо конкретных ситуациях.

Это нас приводит к тому, что стоит разделить различные виды, уровни информационных образов.

1. Доминирующие

Доминирующие образы определяют так называемую доминанту [1] человеческого поведения и его информационный первичный портрет. Это каким человеком его видят абсолютное большинство людей.

2. Активные

Активные образы также являются одними из определяющих в информационном портрете человека. Однако их влияние несколько меньше доминантных, и чтобы до них добраться, необходима более «плотная» коммуникация.

3. Пассивные

Пассивные образы являются, как правило, скрытыми в человеческой деятельности и отвечают за его виртуальное поведение – т.е. мечты, фантазии, проявления в виртуальной среде, например в социальных сетях под вымышленными именами, в онлайн-играх и т.д.

4. Отложенные

Данные образы практически не проявляются внешне в осознанной деятельности индивида и включаются, как правило, лишь в определенных случаях или оказывают свое воздействие без их осознания и выделения в потребность.

Важно отметить, что основную реальную информационную деятельность человека определяют лишь два первых типа образов, третий – в большей степени виртуальную.

Говоря не только об ИО, но и о существующем пространстве ИО, следует определить способы взаимодействия индивидов в рамках данной теории.

Соответственно, взаимодействие, коммуникация индивидов, осуществляется посредством коммуникативного (или коммуникационного) поля индивида (КП).

При взаимодействии двух индивидов КП наслаиваются друг на друга, однако, конечно, ИО человека не могут проникнуть напрямую в КП другого человека, лишь оказать влияние. Чем больше наслаивание, тем выше шанс включения взаимодействия не только доминантных образов, которые проявляют наибольшую информационную активность, но и лежащих глубже в КП. Фактически, это объясняется тем, что чем «плотнее» люди общаются, тем больше они открывают другим и открывают в себе. То есть фактически используется цепочка: образ→ код → коммуник ативное поле→ возмущение в коммуникативном поле другого индивида→ образ → восприятие (рис. 2).

Описания модели внутриобщественных взаимодействий с помощью коммуникационного поля уже предлагалось в некоторых ранних работах авторов, но без использования аппарата пространства информационных образов [7, 8]. Данная модель оказалась довольно удобна для моделирования ряда частных случаев информационно-психологического воздействия на общественное мнение в социуме, и не только [9, 10].

Так образом, коммуникативное поле индивида через информационные образы определяется как пространство, заполняемое ИО и их зоной воздействия. 1-й тип ИО, доминатные ИО, находятся ближе всего к границе данного КП, 2-й – ниже, 3-й еще ниже, 4-й находится уже около условной позиции индивида в центре. Получается, что информационные образы есть квант коммуникативного поля. Вообще, оперируя данным подходом, можно выявить целый ряд сходств теории информационных образов и теории виртуальных частиц в квантовой физике – абстрактных (а по некоторым теориям вполне реальных) частиц, с помощью которых описывают, например, слабое взаимодействие элементарных частиц [11].

Действительно, для первых и вторых специфически выполняются законы сохранения, или даже не выполняются, характерна особая пара-

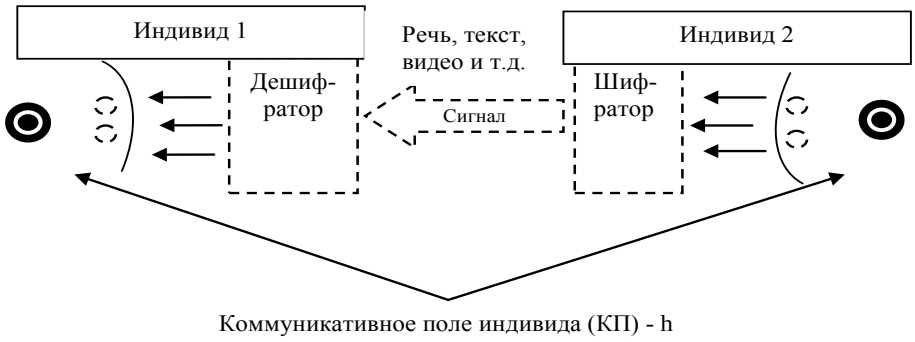


Рис. 2. Условная схема области взаимодействия между коммуникативными полями индивидов

метризация, включая такие значения массы, как отрицательная, мнимая и т.д. При этом и те и другие генерируются вполне реальными объектами (первые индивидом, вполне подчиняющимся законам физики, вторые – другими элементарными и не только частицами), а также они оказывают влияние на реальные объекты и способны менять их характеристики.

Так, например, опишем взаимодействие двух индивидов и их КП (рис. 3). В результате взаимодействия ИО могут измениться сами, изменить другие ИО, как «родные», так и другого индивида, а также изменить параметры самого индивида (путем изменения его когнитивных установок и реальной и виртуальной памяти).

В таком случае параметр приобретает конкретизированное значение [12].

Пространство ИО нельзя рассматривать как классическое физическое пространство, поскольку сила взаимодействия между ИО разных субъектов (эффективность коммуникации) не зависит от расстояния между источником и реципиентом. Помимо, собственно, физических пространственных координат, в нем будут и социальные координаты (характеризующие социальные возможности индивида), поэтому пространство ИО многомерное, социально-физическое, характеризующее возможность одного индивида «дотянуться» своим коммуникационным полем до другого, т. е. повлиять на него, на его коэффициенты и возможность перемещаться.

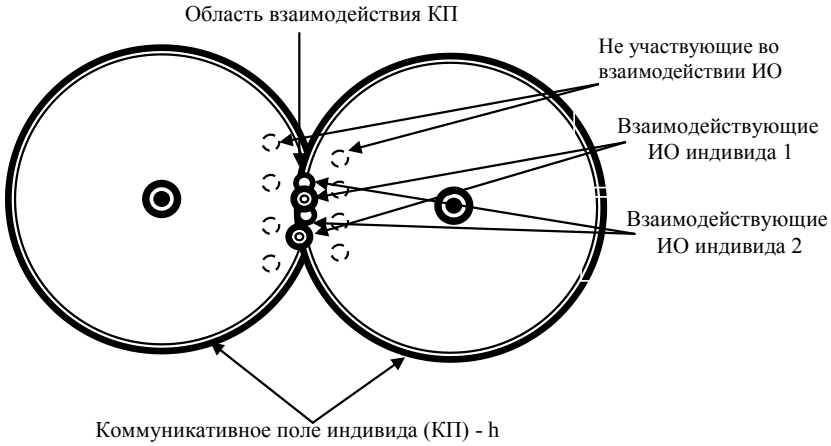


Рис. 3. Взаимодействие коммуникативных полей двух индивидов

Существует вероятностная характеристика и внутренних взаимодействий коммуникативного поля, в результате которой ИО меняют друг друга без внешнего воздействия, однако, как правило, именно внешнее воздействие является катализатором изменения внутренней структуры коммуникативного поля индивида и его характеристик. Параметризуя информационные образы, можно определить несколько основных параметров, которые определяют их основные качества.

Первый параметр, введение которого абсолютно логично, учитывая уже введенную систему разделения ИО по уровням, – энергия информационного образа. Уровни же образов интерпретируется как энергетические, что нас опять выводит на некоторую аналогию с элементарными частицами.

Соответственно, при повышении или понижении своей энергии в результате внутреннего или внешнего воздействия ИО может перескочить на другой энергетический уровень и сменить свой тип (например, с активного на доминантный или наоборот). Схематическое разделение по уровням ИО в коммуникативном поле изображено на рис. 4. Для интеграции предложенной модели в подходы, которые способны описывать общественные процессы, можно определить энергию ИО как социальную энергию из «социально-энергетического подхода».

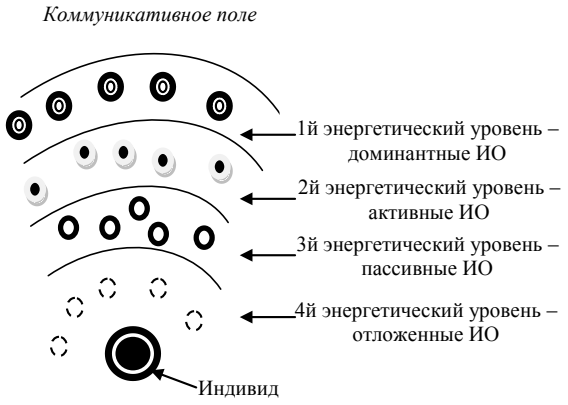


Рис. 4. Энергетические уровни в коммуникативном поле индивидов

Как уже было сказано выше, ИО имеют свои энергетические уровни.

В результате постоянного коммуникационного взаимодействия возникает некое социальное давление, характеризующее интенсивность воздействия окружающей системы.

Введем тогда $P_{соц}$ – социальное давление, возникающее из-за разности основных коэффициентов и социальной энергии между индивидами или подсистемами индивидов в границах их коммуникационных полей.

Силу давления легко можно определить через энергию [11]:

$$P_{\text{соц}} = \frac{2}{3} n < \text{E}_{\text{взаим}} >,$$

где n – количество индивидов.

$\text{E}_{\text{взаим}} = \Psi \text{E}_{\text{полн}}$ – энергия взаимодействия, т.е. та энергия, которую индивид или подсистема индивидов могу направить на взаимодействие с другими индивидами или подсистемами индивидов. Очевидно, что она не может быть больше полной социальной энергии индивида.

Ψ – коэффициент передачи энергии,

$$\Psi^i = \text{K}_{\text{н}}^i \text{K}_c^i.$$

Таким образом, для каждого индивида i верно

$$\text{E}^i{}_{\text{взаим}} = \Psi^i \text{E}^i{}_{\text{полн}}.$$

Так как диссипации энергии в социально-физическом пространстве нет, то можно считать данную систему гамильтоновой:

$$\text{E}^i{}_{\text{взаим}} = \Psi^i \text{H}^i,$$

где $^{i}\text{H}^i$ – гамильтониан индивида или подсистемы индивидов. Тогда можно записать первое каноническое гамильтоново уравнение:

$$\frac{d}{dt} P^{ij}{}_{\text{соц}} = \Psi^i \text{E}^i{}_{\text{полн}} - \Psi^j \text{E}^j{}_{\text{полн}} = \Delta(\Psi^{ij} \text{E}^{ij}{}_{\text{полн}}).$$

Отсюда

$$\frac{d}{dt} P^{ij}{}_{\text{соц}} = \Delta \text{E}^{ij}{}_{\text{взаим}},$$

что приводит нас к

$$\frac{d}{dt} P^{ij}{}_{\text{соц}} = \Delta(\Psi^{ij} \text{H}^{ij}) \ .$$

Таким образом, мы получили уравнение информационно-социального давления, с помощью которого возможно рассчитать уровень воздействия на конкретного индивида или группу индивидов со стороны иных индивидов или групп индивидов.

Работа частично выполнена при поддержке Совета по грантам президента РФ (проект МК-7165.2015.6). Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-18-00047).

Литература

1. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М. : УРСС, 2009. 300 с.

2. *Griffith D., Greitzer F.* Neo-symbiosis: The next stage in the evolution of human-information interaction // Cognitive informatics and natural intelligence. 2007. V. 1(1). P. 39–52.

3. *Scholtz J.* Metrics for evaluating human information interaction systems // Interacting with Computers. 2006. V. 18. P. 507−527.

4. *Lee T.M., Liu H.L., Chan C.C., Ng Y.B., Fox P.T., Gao J.H.* Neural correlates of feigned memory impairment // Neuroimage. 2005. V. 28. P. 305–313.

5. *Александров Ю.И.* Закономерности актуализации индивидуального опыта и реорганизации его системной структуры: комплексное исследование // Труды ИСА РАН. 2011. Т. 61, № 3. С. 3–25.

6. *Крюков В.И.* Модель внимания и памяти, основанная на принципе доминанты и компараторной функции гиппокампа // Журнал высшей нервной деятельности. 2004. Т. 54, № 1. С. 10–29.

7. *Петухов А.Ю.* Моделирование манипуляций сознанием масс в политическом процессе с помощью коммуникационного поля // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород, 2011. Вып. 6. С. 326–331.

8. *Петухов А.Ю., Чупракова Н.С.* Моделирование пороговых эффектов в социальных и политических процессах. Социально-энергетический подход // Современные исследования социальных проблем : (электронный научный журнал). 2013. № 8(28). С. 69. URL: http://dx.doi.org/10.12731/2218-7405-2013-8-69.

9. *Mustajoki A.* A speaker-oriented multidimensional approach to risks and causes of miscommunication // Language and Dialogue. 2012. V. 2 (2:2). P. 216–243. DOI: 10.1075/ld.2.2.03mus.

10. *Helsel S.K., Roth, J.P. (Eds.).* Virtual reality: Theory, practice, and promise. Westport, CT : Meckler Corporation, 1991. 490 p.

11. *Окунь Л.Б.* Элементарное введение в физику элементарных частиц. 3-е изд. М. : Физматлит, 2009. 128 с. ISBN 978-5-9221-1070-9.

12. *Petukhov A.Y.* Threshold effects in the social and political processes. Social-energy approach // World Applied Sciences Journal. 2014. V. 30 (10). P. 1340–1345. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.10.14147.

Индивидуальные особенности траекторий осмотра эмоционально значимых изображений

Л.Н. Подладчикова, Т.И. Колтунова, Д.Г. Шапошников, О.В. Ломакина

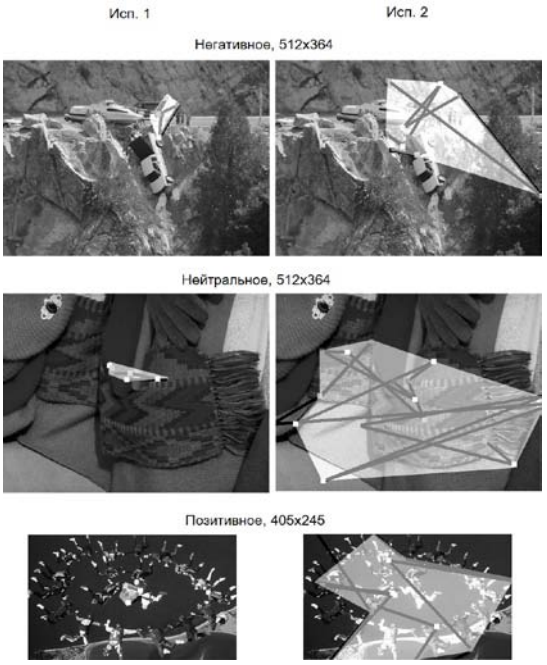
НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана ЮФУ, Ростов-на-Дону

Введение. Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических исследований ([1–5] и мн. др.), многие аспекты в понимании механизмов осмотра сложных изображений и сцен остаются актуальной проблемой. В частности, важной задачей является поиск количественных критериев для оценки когнитивной нагрузки и способов избирательной активации восходящих и нисходящих механизмов регуляции зрительного внимания. Сложность решения этой задачи обусловлена, в первую очередь, одновременным участием механизмов разного уровня (от первичных сенсорных до когнитивных), взаимодействующих между собой и находящихся под воздействием многих факторов. Один из таких факторов – степень эмоционального воздействия изображения на человека. Исследования восприятия эмоций указывают на приоритет эмоционально значимых стимулов при зрительном восприятии по сравнению с эмоционально нейтральными изображениями [6, 7].

Известно множество работ [6–12], в которых изучается влияние эмоциогенности стимулов на отдельные параметры движений глаз, но лишь в единичных исследованиях анализируются статистические параметры траекторий осмотра, такие как количество и длительность фиксаций, амплитуда саккад и общая длина траекторий [8]. Вместе с тем необходимо изучение динамики структуры траекторий осмотра, поскольку она рассматривается как важный ключ к пониманию механизмов зрительного внимания ([1, 2] и мн. др.). Кроме того, в большинстве работ [7–12] в основном сравниваются эффекты типа и силы эмоционального воздействия, а индивидуальные различия траекторий осмотра лишь констатируются, без количественных оценок индивидуальности.

В данной работе представлены результаты изучения количественных параметров оценки индивидуальных особенностей траекторий движений глаз в процессе осмотра эмоциогенных изображений из базы IAPS [13].

Результаты. В тестах принимали участие 20 испытуемых (средний возраст 22 года). Движения глаз регистрировались с помощью системы SMI iView X Hi-Speed 1250 Гц. В соответствии с принятыми стандартами [9] каждое из изображений (6 негативных, 10 позитивных и 10 нейтральных) предъявлялось каждому испытуемому в течение 6 с. У каждого испытуемого тип траекторий оценивался по вероятности детектирования областей интереса при осмотре группы эмоциогенных изображений каждого типа. Области интереса идентифицировались по пространственному распределению точек фиксации взгляда с помощью модифицированного метода ближайшего соседа [3]. Были выделены 3 группы испытуемых: 1) с доминированием фокальных траекторий (области интереса детектированы в более чем 50 % тестов, 7 испытуемых); 2) с доминированием сканирующих траекторий (области интереса идентифицированы в менее чем 30 % тестов, 8 испытуемых); 3) испытуемые со смешанным типом траекторий осмотра (5 человек). Визуальный анализ результатов показал, что доминирующий тип траектории у каждого испытуемого сохраняется при осмотре изображений с различной эмоциональной окраской (см. рисунок). Для количественной оценки этого феномена вычислялся коэффициент корреляции Пирсона между долями тестов с областями интереса во всей выборке испытуемых. Обнаружена высокозначимая корреляция в трех сочетаниях тестов: между негативными и позитивными изображениями, негативными и нейтральными, позитивными и нейтральными (r равен 0,83; 0,81 и 0,77 соответственно). При этом количество тестов, в которых были идентифицированы области интереса, несколько больше при предъявлении позитивных изображений, чем негативных (p = 0,56, n = 200 и p = 0,48, n = 120 соответственно).



Примеры областей осмотра (оконтуренные светлые фигуры) «негативного», «нейтрального» и «позитивного» изображений у двух испытуемых. Над каждым изображением указан его размер в пикселях

Для более детального количественного сравнения траекторий осмотра испытуемых с доминированием траекторий фокального и сканирующего типов было проведено несколько видов анализа, результаты которого отражены в таблице. Площадь области осмотра [14] определялась в каждом тесте как часть изображения внутри контурной фигуры (см. рисунок), формируемой внешними

точками фиксаций. Она вычислялась как процент от площади всего изображения. Статистическая оценка различий между испытуемыми с доминированием траекторий фокального и сканирующего типов по *t*-критерию Стьюдента показала их значимость ($p < 0,05$) для первых трех параметров, представленных в таблице. Различия в количестве точек фиксаций в тесте и в длительности фиксаций между этими группами испытуемых проявляются на уровне тенденции.

Сравнение параметров глазных движений испытуемых

Параметры	Тип траектории осмотра	
	фокальный	сканирующий
Доля тестов с областями интереса	0,75 (n = 102)	0,22 (n = 104)
Доля точек фиксаций в областях интереса	0,79 (n = 835)	0,41 (n = 271)
Площадь области осмотра, %	3	25
Среднее количество точек фиксаций в тесте	10 ± 1	13 ± 1
Средняя длительность фиксаций, мс	349 ± 16 (n = 835)	325 ± 15 (n = 271)

Заключение. Проведенное исследование показало: а) доминирующий тип траектории глазных движений у данного испытуемого сохраняется при осмотре изображений с различной эмоциональной окраской; б) тестированные параметры (количество тестов с областями интереса, количество точек фиксаций в областях интереса и площадь области осмотра) позволяют определить доминирующий тип траекторий осмотра.

По-видимому, эти результаты указывают на возможность выявления доминирующего типа зрительного внимания у конкретного человека при предъявлении эмоциогенных изображений.

Полученные сведения об индивидуальных различиях траекторий осмотра могут быть сопоставлены с известными данными. Ранее [4] подобные различия в траекториях между полярными группами испытуемых обнаружены в качественном виде при длительном осмотре (более одной минуты) сложных изображений, использованных в работе А.Л. Ярбуса [1]. В работе [8] показано, что вариабельность параметров глазных движений между отдельными субъектами выше, чем вариабельность у отдельного субъекта. В этой же работе обосновывается генетическая предопределенность индивидуальных характеристик траекторий осмотра изображений. По-видимому, индивидуальные особенности траекторий осмотра должны быть формализованы для их использования в моделях, позволяющих исследовать динамику зрительного внимания у конкретного человека при решении текущей зрительной задачи.

Результаты, полученные в проведенном исследовании, в совокупности с ранее обнаруженными фактами [3, 4, 15, 16] позволяют предложить комплексный подход к созданию тестов, основанных на параметрах глазных движений, для оценки доминирующего типа зрительного внимания при решении текущей задачи. Этот подход должен включать: 1) оценку эффекта дистрактора как способа измерения уровня перцептивной нагрузки на зрительную систему человека [15]; 2) определение моментов значимого сопряженного уменьшения длительности фиксаций и увеличения амплитуды саккад как маркеров принятия решения о завершении текущей зрительной задачи [4]; 3) детектирование моментов изменения структуры траекторий как маркеров перехода от доминирования механизмов фокального зрительного внимания к пространственному и наоборот; 4) идентификацию возвратных фиксаций как возможных маркеров оценки семантических отношений между объектами на изображениях и активации механизмов кратковременной памяти [16].

Исследование выполнено в рамках базовой части внутреннего гранта ЮФУ № 213.01-2014/001ВГ.

Литература

1. *Ярбус А.Л.* Роль движений глаз в процессе зрения. М. : Наука, 1965.

2. *Priviterra C.M., Stark L.* Scanpath theory, attention and image processing algorithms for prediction of human eye fixations // Neurobiology of Attention / L. Itti, G. Rees, J.K. Tsotsos (Eds). Elsevier : Academic Press, 2005. P. 296-299.

3. *Podladchikova L.N. et al.* Model-based approach to study the mechanisms of complex image viewing // J. Opt. Mem. and Neural Net. (Inf. Optics). 2009. V. 18(2). P. 114–121.

4. *Podladchikova L.N. et al*. Temporal dynamics of fixation duration, saccade amplitude, and viewing trajectory // J. Int. Neurosci. 2009. V. 8(04). P. 487–501.

5. *Yamaguchi S., Onoda K.* Interaction between emotion and attention systems // Front. Neurosci. 2012. V. 6(139). P. 1–2.

6. *Calvo M.G., Lang P.J.* Parafoveal semantic pro-cessing of emotional visual scenes // J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform. 2005. V. 31(3). P. 502–512.

7. *Pilarczyk J., Kuniecki M.* Emotional content of an image attracts attention more than visually salient features in various signal-to-noise ratio conditions //J. Vision. 2014. V. 14(12). P. 1–19.

8. *Gibboni III, R.R. et al.* Individual differences in scanpaths correspond with serotonin transporter genotype and behavioral phenotype in rhesus monkeys (Macaca mulatta) // Front. Behav. Neurosci. 2009. V. 3(50). P. 1–11.

9. *Bradley M.M. et al*. Scan patterns when viewing natural scenes: Emotion, complexity, and repetition // Psychophysiol. 2011. M. 48. P. 1543–1552.

10. *Humphrey K. et al.* Salience of the lambs: A test of the saliency map hypothesis with pictures of emotive objects // J. Vision. 2012. V. 12(1), 22. P. 1–15.

11. *Niu Y. et al.* Affective salience can reverse the effects of stimulus-driven salience on eye movements in complex scenes // Front. Psychol. 2012, 3:336. DOI: 10.3389/fpsyg. 2012.00336.

12. *Ni J. et al*. Dissociable modulation of overt visual attention in valence and arousal revealed by topology of scan path // PLoS ONE. 2011. V. 6(4), e18262.

13. *Lang P.J. et al.* International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual : Technical Report A-8 / University of Florida, Gainesville, FL, 2008.

14. *Осинов В.А. и др.* Динамика пространственно-временных характеристик осмотра изображений: модель и эксперимент // Нейроинформатика : эл. рецензируемый журнал. 2012. Т. 6(1). С. 1–11.

15. *Koltunova T.I., Podladchikova L.N.* Distractor effect at initial stages of recognition depends on visual image properties // J. Integr. Neurosci. 2013. V. 12(1). P.91–101.

16. *Подладчикова Л.Н. и др*. Особенности локальных элементов траекторий осмотра изображений: объектно-возвратные фиксации взгляда // Мат. XVII всерос. науч.-тех. конф. «Нейроинформатика-2015». М., 2015. Ч. 3. С. 210–219.

Картирование острого стресса и стрессогенных событий у водителей в контексте обучения и профессиональной деятельности

С.А. Полевая[1], С.Б. Парин[2], М.М. Некрасова[1], М.Е. Елисеев[3], В.В. Крупа[3], И.С. Шишалов[2], Е.В. Еремин[1]

[1]Нижегордская государственная медицинская академия
[2]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[3]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
s453383@mail.ru

Деятельность водителя предъявляет особые требования к ресурсам и адаптивности физиологической системы [1]. В процессе управления транспортным средством (ТС) водитель испытывает стрессы, при которых повышается риск возникновения опасной дорожной ситуации. Для предупреждения таких ситуаций необходимо своевременное выявление стрессогенных элементов дорожной инфраструктуры и других источников экстремальных состояний у водителей.

Целью работы было исследование влияния внешнего и внутреннего контекста на уровень стрессовой нагрузки и изменение психофизиологического состояния у водителей.

В ходе работы решались следующие задачи:

1) разработка комплекса методов, обеспечивающих мониторинг стрессовых состояний у водителей;

2) исследование динамики вегетативной регуляции кардиоритма у водителей во время управления ТС;

3) исследование влияния исходного психофизиологического состояния водителя на стрессогенность управления ТС;

4) исследование влияния факторов дорожной среды на стрессогенность поездки.

Материалы и методы исследования

В исследовании при информированном согласии принимали участие курсанты и инструкторы автошколы (6 человек). Параллельные измерения психофизиологических показателей на разных этапах обучения (начало, середина, конец) позволили сопоставить данные курсантов с результатами опытных инструкторов, которые в процессе учебных поездок находились с курсантами в одинаковых внешних условиях. Более месяца проводили мониторинг водителя личного транспорта (мужчина, возраст 22 года, водительский стаж 4 года). Было зарегистрировано 19 поездок по одному и тому же маршруту на одном и том же автомобиле. Таким образом, удалось стандартизировать маршрут и его сложность, особенности автомобиля, а также персональные особенности и опыт водителя. Переменными оставались дорожная ситуация и исходное состояние водителя.

До и после поездки у водителей регистрировали уровень эмоциональной дезадаптации (УЭД) [2] и функцию цветоразличения (ФЦР) по дифференциальным порогам цветоразличения в базовых оттенках (красном – R; зеленом – G; синем – B) с помощью компьютерной технологии цветовой кампиметрии (КМ) [3]. Способ оценки УЭД на основе проективно-вербальной методики обеспечивает диагностику степени психической дезадаптации и определение характера переживаемых эмоций по 4 шкалам: безопасность, независимость, достижение и признание [2, 4]. Технология КМ позволяет определять уровень эмоционального напряжения по шкале «эмоциональное истощение – оптимальное состояние – стресс», а также нарушения функции внимания и оперативной памяти [5].

Для непрерывных телеметрических измерений сердечного ритма в условиях естественной деятельности использовали разработанный комплекс, состоящий из беспроводного датчика ЭКГ ZephyrBioHarness и смартфона с операционной системой Android и специализированным программным обеспечением «HR-Reader» [6]. Конструкция датчика ЭКГ обеспечивает надежную фиксацию его на теле человека и не создает неудобств. Передача данных на смартфон организована по беспроводному каналу Bluetooth. Для синхронизации по времени записей ритмограмм сердечного ритма и данных видеорегистрации со спутниковой системой навигации был организован интернет-ресурс (рис. 1).

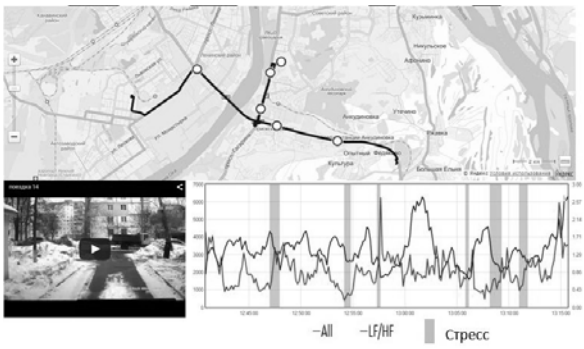


Рис. 1. Картирование стрессогенных участков маршрута

При анализе результатов исследования вычислялись спектральные показатели вариабельности сердечного ритма (ВСР): суммарная мощность спектра – TP (на рисунке All) (мс^2); мощность спектра в области высоких частот – HF (мс^2), отражает влияние парасимпатического отдела веге-

тативной нервной системы (ВНС); мощность спектра в области низких частот – LF (мс^2), показывает изменение тонуса симпатического отдела ВНС; соотношение мощностей спектра в области низких и высоких частот (индекс вегетативного баланса) – LF/HF (ИВБ). Для увеличения разрешения по времени в описании динамики вегетативной регуляции проводился динамический фурье-анализ с окном 100 с и шагом 10 с [6, 7].

В ходе мониторинга регистрировали изменения спектральных показателей ВСР, характерные для начальной стадии острого стресса, проявляющиеся в динамике: одновременное снижение показателя TP и возрастание LF/HF. Выделение специфической для стресс-реакции динамики спектральных показателей ВСР основано на положении трехкомпонентной теории нейрохимических механизмов развития экстремальных состояний [8]. Фиксировались продолжительность и количество стресс-реакций за время мониторинга. Для оценки степени хронизации стресса рассчитывали индекс стрессовой нагрузки (ИСН) как отношение продолжительности всех стрессовых реакций к времени записи.

Благодаря программной платформе, разработанной в рамках проекта StressMap, удалось собрать вместе данные ритмограмм водителя, GPS-трекинг и видеозаписи и составить карту, на которой были отмечены основные очаги напряженности. Для выделения категорий событий была разработана универсальная классификация, состоящая из 22 стресс-факторов и включающая все типичные дорожные ситуации. Стресс-факторы – это события, согласованные по времени с эпизодами острого стресса. Все зарегистрированные стресс-факторы были разделены на 4 класса:

- операционные стресс-факторы (операции в процессе управления) – ОСФ;
- инфраструктурные стресс-факторы (стационарные и динамические элементы дорожной инфраструктуры) – ИСФ;
- социальные стресс-факторы I (взаимодействие с другими транспортными средствами) – ССФТ;
- социальные стресс-факторы II (взаимодействие с пешеходами) – ССФП.

Значимость каждого класса факторов оценивали по их доле в общем количестве стрессогенных событий, выявленных за период наблюдения.

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием программного пакета Statistica 6.0.

Результаты

В результате исследования у курсантов были обнаружены связи между показателями УЭД, количеством ошибок и стрессов за поездку (рис. 2, *а*). Данные результаты показывают, что чем выше уровень дезадаптации до поездки у курсантов, тем больше ошибок и больше стрессов возникает в процессе поездки. Также было отмечено, что чем выше исходная дезадаптации у курсантов по шкале «Безопасность», тем больше стрессов возникает за поездку (рис. 2, *б*). Таким образом, чем больше у курсанта перед поездкой представлена потребность в безопасности, тем больше стрессов он испытывает в процессе занятия.

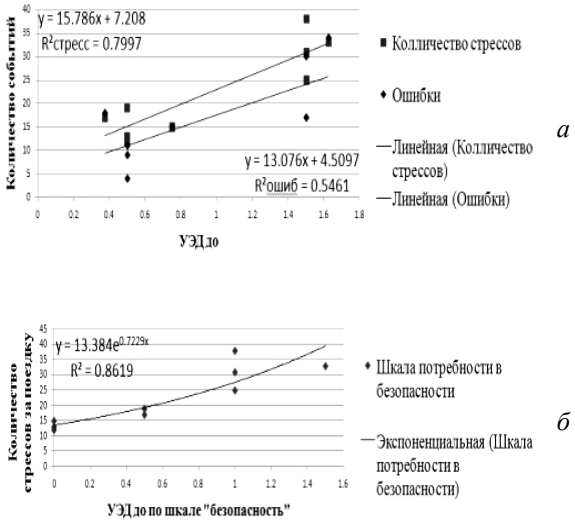


Рис. 2. Динамика изменений УЭД курсантов и количества ошибок и стрессов на единицу времени (*а*) и влияние УЭД курсантов по шкале «Безопасность» до поездки на количество стрессов за поездку (*б*)

У инструкторов были обнаружены связи между показателями УЭД, ВСР и количеством стрессов. Чем выше изначальный уровень эмоциональной дезадаптации по шкалам «Безопасность» и «Независимость», тем выше уровень дезадаптации у инструкторов после поездки (рис. 3, *а*). Также было установлено, что у инструкторов с увеличением количества стрессов наблюдается усиление редукции общей мощности ВСР (рис. 3, *б*).

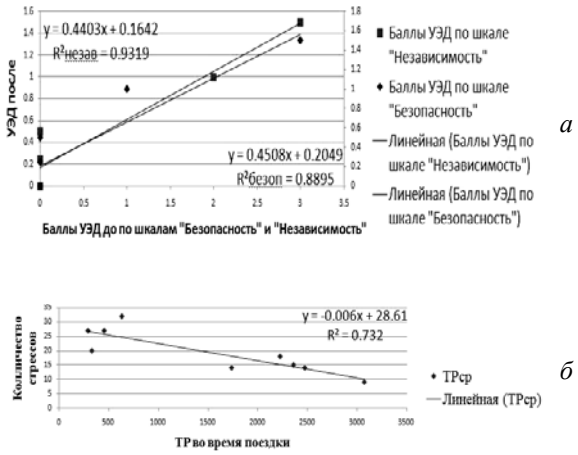


Рис. 3. Влияние начального УЭД по шкалам «Безопасность» и «Независимость» на УЭД после поездки (*а*) и общего количества стрессов за поездку на ВСР у инструкторов (*б*)

Таким образом, исходное эмоциональное состояние курсанта влияло на количество ошибок и стрессов, возникающих в процессе управления автомобилем. У инструкторов же наблюдалась зависимость эмоционального состояния после поездки от исходного состояния, а также усиливаю-

щаяся редукция общей мощности ВСР под воздействием возрастающего числа стрессов.

В ходе лонгитюдного исследования было отмечено, что за время мониторинга (общая продолжительность поездок составила 43733 с) водитель личного транспорта испытал действие 355 стресс-факторов.

В рейтинговом списке стресс-факторов первое место занимают операционные (46 %); второе – социальные стресс-факторы первого типа (29 %), подразумевающие взаимодействие с другими транспортными средствами; третье – инфраструктурные стресс-факторы – стационарные и динамические элементы дорожной инфраструктуры (18 %); четвертое – социальные стресс-факторы второго типа – взаимодействие с пешеходами (7 %) (рис. 4).

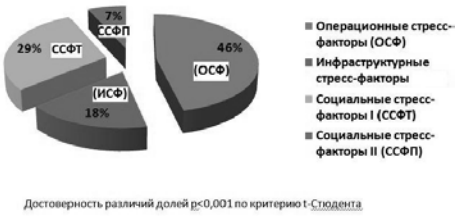


Рис. 4. Распределение стресс-факторов по классам при мониторинге водителя личного транспорта

При мониторинге водителя личного транспорта было установлено, что во время сессий все спектральные показатели ВСР достоверно ниже, чем до и после поездки, а ИВБ во время управления ТС достоверно выше фонового и не изменяется в период регистрации после поездки (рис. 5).

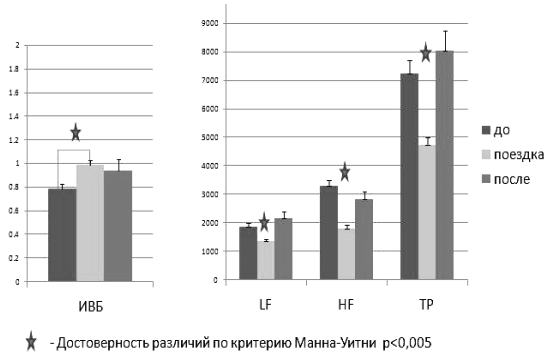


Рис. 5. Динамика показателей ВСР водителя личного транспорта до, во время и после поездки

Общее распределение функции цветоразличения по сессиям не изменилось после поездок, однако в 47 % поездок произошла смена типа функции: в 26 % от доминирования зеленого к доминированию синего, в 21 % наоборот (рис. 6).

Из этого следует, что по уровням порогов цветоразличения в 53 % поездок эмоциональное и физическое состояние водителя после завершения управления ТС не изменилось, в 26 % ухудшилось, а в 21 % улучшилось. После поездки достоверно снижается дифференциальный порог в красном оттенке, что свидетельствует об уменьшении уровня эмоционального напряжения.

Рис. 6. Динамика типа ФЦР при управлении ТС

Также уменьшается и уровень дезадаптации по шкале «Единение». В 50 % сессий УЭД после поездки стал ниже, а в 41 % поездок – выше. Парадоксально, что в сессии с увеличением УЭД стрессов было достоверно меньше, чем в сессии с уменьшением УЭД (рис. 7).

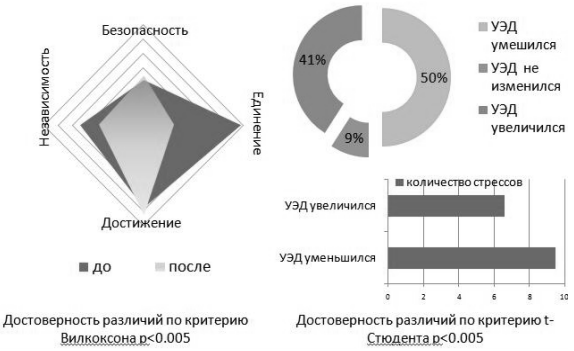


Рис. 7. Динамика показателей УЭД при управлении ТС

Кластеризация методом *k* средних по стресс-факторам разного класса, продолжительности и количеству стрессов за каждую поездку позволила определить существование кластера событий, специфичного для поездок, повышающих дезадаптацию. Чувствительность кластера 100 %, а надежность 85 % (рис. 8).

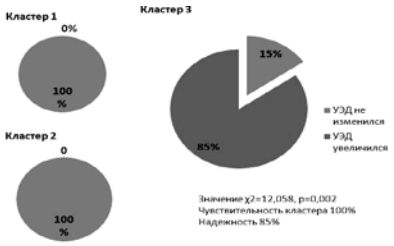


Рис. 8. Выделение кластера событий, повышающих дезадаптацию

Особенности событийного контекста для дезадаптирующих поездок выявлены с помощью многофакторного дисперсионного анализа ANOVA.

Количество и продолжительность стрессов в дезадаптирующих поездках было достоверно меньше. Достоверно меньше наблюдалось и событий, провоцировавших острый стресс, связанных со сложностью управления машиной и со взаимодействием с другими участниками движения и элементами дорожной инфраструктуры (рис. 9).

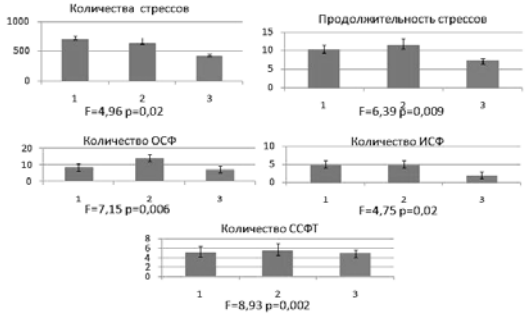


Рис. 9. Особенности событийного контекста для дезадаптирующих поездок по результатам многофакторного дисперсионного анализа ANOVA

Парадоксальность выводов о дезадаптирующих поездках подтверждается результатами кластерного анализа с выделением кластеров, достоверно отличающихся по индексу стрессовой нагрузки во время поездки (рис. 10). Исходное состояние в кластере с меньшей стрессовой нагрузкой (F = 6,62; p = 0,02) можно рассматривать как оптимальное. В этом исходном (до поездки) состоянии оказалась больше активность симпатической (F = 24,6; p = 0,001) и парасимпатической нервной системы (F = 8,4; p = 0,01), больше общая мощность спектра (F = 16,96; p = 0,001) и ниже уровень эмоциональной дезадаптации. Однако уровень стрессовой нагрузки и изменения функционального состояния после поездки не отразились в итогом уровне эмоциональной дезадаптации, что может указывать на затруднения в адекватном восприятия испытуемым собственного состояния сразу после поездки.

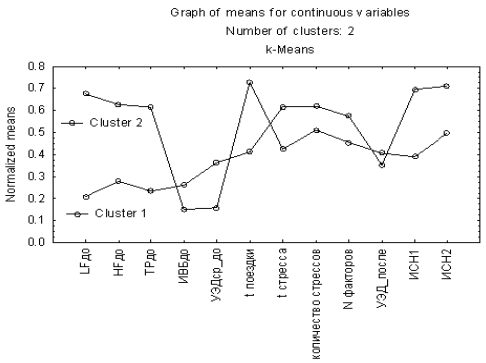


Рис. 10. Выделение кластеров состояний, отличающихся по индексу стрессовой нагрузки во время поездки

Проведенное исследование и выявленные персональные особенности подтверждают важность проведения персонифицированного мониторинга у водителей.

Выводы

1. Комплекс методов, включающий регистрацию кардиоритма, оценку УЭД, измерение дифференциальных порогов цветоразличения и видеозапись дорожной ситуации, позволяет исследовать влияние внутренних и внешних контекстов на уровень стресса у водителей во время управления ТС.

2. В процессе поездки происходит снижение адаптационного потенциала по основным показателям вариабельности сердечного ритма по сравнению с фоновым режимом и повышение уровня УЭД, что указывает на стрессогенный характер контекста управления ТС.

3. Оптимальному режиму управления транспортным средством соответствует низкий исходный уровень эмоциональной дезадаптации и высокие показатели активности симпатической и парасимпатической нервной системы.

4. В рейтинговом списке стресс-факторов первое место занимают операционные, связанные с операциями в процессе управления ТС, второе – социальные первого типа, связанные с взаимодействием с другими ТС; третье – инфраструктурные стресс-факторы, связанные с элементами дорожной инфраструктуры; четвертое – социальные второго типа, связанные с взаимодействием с пешеходами.

Литература

1. *Баевский Р.М., Берсенева А.П., Берсенев Е.Ю.* Использование принципов донозологической диагностики для оценки функционального состояния организма при стрессорных воздействиях (на примере водителей автобусов) // Физиология человека : журнал РАН. 2009. № 1(35). С. 41–51.

2. Способ оценки эмоционального состояния человека : патент РФ RU 2291720 C1 / Григорьева В.Н., Тхостов А.Ш. Опубл. 20.01.2007 в Б.И. № 2.

3. Способ исследования цветового зрения человека : патент Российской Федерации RU 2222250 / Щербаков В.И., Паренко М.К., Полевая С.А., 2002.

4. *Рунова Е.В., Григорьева В.Н., Бахчина А.В., Парин С.Б., Шишалов И.С., Кожевников В.В., Некрасова М.М., Каратушина Д.И., Григорьева К.А., Полевая С.А.* Вегетативные корреляты произвольных отображений эмоционального стресса // Современные технологии в медицине. Н. Новгород : НижГМА, 2013. Т. 5, № 4. С. 69–77.

5. *Полевая С.А.* Интеграция эндогенных факторов в систему обработки экстероцептивных сигналов : автореф. дис. … докт. биол. наук. Пущино, 2009.

6. Способ определения стресса : патент Российской Федерации RU 2531443 / Некрасова М.М., Полевая С.А., Парин С.Б., Шишалов И.С., Бахчина А.В., 2014.

7. *Федотова И.В., Некрасова М.М., Рунова Е.В., Бахчина А.В., Аширова С.А., Кожевников В.В., Шишалов И.С., Парин С.Б., Полевая С.А.* Телекоммуникационные технологии для мониторинга функционального состояния у водителей в процессе работы // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра СО РАМН. 2013. № 3 (91). Ч. 1. С. 122–125.

8. *Парин С.Б.* Нейрохимические и психофизиологические механизмы стресса и шока // Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород : ННГУ, 2001. С. 20–28.

Нейрофизиологические особенности категоризации конкретных и абстрактных слов с негативным и нейтральным праймом

П.А. Продиус, Н.С. Нужина, И.В. Мухина

[1]Нижегородская государственная медицинская академия Минздрава

Введение

Связанные с событиями потенциалы (ССП) являются отражением переработки информации во время умственной деятельности. На переработку информации влияют различные физические, биологические, социальные и индивидуальные факторы. Умственная деятельность может протекать под влиянием сигналов, имеющих положительную или отрицательную эмоциональную валентность. Эмоции могут ухудшать, замедлять переработку информации при категоризации. В то же время эмоциональная окраска стимульного материала улучшает мнестическую деятельность [1].

Речевая информация имеет последовательную структуру. При этом предыдущее слово (прайм) влияет на восприятие последующего (цель). Это явление, названное прайминг-эффектом, выражается в изменении скорости реакции и количестве ошибок и изменении амплитуды и пиковой латентности ССП [2]. Эмоциональное прайминговое воздействие может оказывать влияние на выполнение заданий с нейтральным содержанием и вызывать негативный прайминг-эффект (замедление времени реакций, увеличение количества ошибок) [3].

Большинство таких исследований проведено в имплицитной форме (когда короткая экспозиция прайма не позволяет осознать слово) или в эксплицитной, но с коротким интервалом между началом предъявления прайма и целевого слова (SOA). При таких условиях можно наблюдать прежде всего эффекты автоматической регуляции умственной деятельности.

В нашем исследовании, увеличив SOA до 1400 мс, мы рассчитывали увидеть особенности произвольной регуляции обработки пар слов «прилагательное – существительное» при категоризации. Предполагалось, что основные изменения нейтрального прайма относительно негативного будут в лобных и центральных отделах (субстраты произвольной деятельности и эмоциональной сферы). Также ожидали выявить отличия влияния аффективного прайма на мыслительные процессы с конкретными и абстрактными словами.

Методы

Участники исследования – 15 испытуемых в возрасте от 18 до 22 лет (7 юношей и 8 девушек) с преобладанием правой моторной асимметрии. Стимульный материал – 160 пар слов: 80 прилагательных с нейтральной (*простой*, *прямой*) и 80 прилагательных с негативной эмоциональной валентностью (*жуткий*, *мерзкий*); 80 абстрактных (*момент*, *пример*) и 80 конкретных (*хомяк*, *филин*) существительных. Пары слов – прилагательное и существительное – подбирали с низкой частотой ассоциации с помощью «Русского ассоциативного словаря». Из стимульного материала убирали высоко- и низкочастотные слова с помощью «Нового частотного словаря русской лексики». Средняя длина прилагательных 6–7 букв, существительных – 5–6 букв. Дизайн эксперимента: испытуемые смотрели в центр экрана и нажимали на одну из кнопок, означающих конкретную или абстрактную категорию. Стимулы предъявлялись с помощью программы «PsychoPy». На экране на 1 с появлялся фиксационный крест, затем 200 мс серый фон, 1200 мс прайм (прилагательное), 200 мс серый фон, 1200 мс цель (существительное), 200 мс серый фон, знак вопроса (до нажатия кнопки). После 80 циклов делали короткий перерыв. Регистрация ЭЭГ осуществлялась на энцефалографе «Нейрон-СпектрВПМ» («Нейрософт») с помощью программы «Нейрон-Спектр.Net» с частотой дискретизации 1000 Гц в 9 отведениях (F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4). Для анализа сравнивали усредненные отрезки ЭЭГ в 1200 мс после предъявления цели в четырех группах: 1) нейтральная/абстрактная, 2) негативная/абстрактная, 3) нейтральная/конкретная и 4) негативная/конкретная. Достоверность поточечного сравнения средних значений амплитуды ССП и времени реакции проводили с помощью *t*-критерия Стьюдента. Коррекцию на множественное сравнение с помощью критерия перестановок проводили в модуле NME для Python [9, 10, 11]. Достоверность различий пиковой латентности определяли с помощью непараметрического рангового критерия Вилкоксона.

Результаты

Поведение. Время категоризации абстрактных существительных с нейтральными прилагательными было на 42 мс дольше конкретных (таб. 1). Эти результаты согласуются с литературными данными [4]. Большинство испытуемых во всех группах не сделали ошибок, количество ошибок у отдельных испытуемых не превышало 1 %. Особенностью этого задания было отсутствие отрицательного прайминг-эффекта по времени реакции.

Таблица 1

Время категоризации абстрактных и конкретных существительных

Прайм	Цель	
	абстрактная, мс	конкретная, мс
Нейтральный	403,8	361,7*
Негативный	384,5	362,3

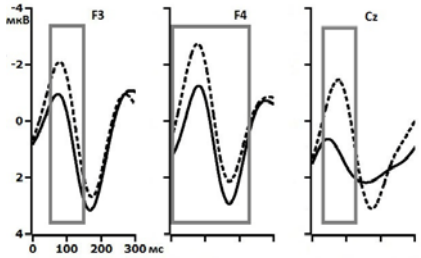
Примечание: * $p \leq 0{,}016$ между нейтральным праймом – абстрактной целью и нейтральным праймом – конкретной целью.

Сравнение ССП конкретных существительных (таб. 2). N1-эффект: негативная валентность прайма (прилагательных) увеличивала амплитуду ранней негативной волны N1 в лобных отведениях и вертексе (F3, F4, Cz) (рисунок). Наиболее выражены различия в вертексе по амплитуде (0,65 и –1,4 мкВ) и по пиковой латентности (51 и 76 мс). P2-эффект наблюдается в уменьшении амплитуды в правом лобном отведении (2,93 и 2,15 мкВ) и противоположной тенденции к увеличению в области вертекса (2,18 и 3,12 мкВ) (рисунок). N400-эффект в вертексе проявляется в статистически достоверном увеличении пиковой латентности (783 и 859 мс; $p \leq 0{,}001$) после негативного прайма.

Таблица 2

Интервалы ССП с достоверными различиями после проверки на множественное сравнение между серией нейтральный прайм – конкретная цель и негативный прайм – конкретная цель

Отведения	Интервал ССП (мс)	Различия между группами ($p \leq$)
F3	48–149	0,0406
F4	4–219	0,0018
Fz	–	–
C3	–	–
C4	–	–
Cz	36–123	0,0286
P3	–	–
P4	–	–
Pz	–	–



Кривые ССП на предъявление конкретных существительных после нейтральных (сплошная линия) и негативных (пунктирная линия) прилагательных в лобных отведениях. Интервал ССП со статистически достоверными отличиями ($p < 0{,}05$) между точными и неточными группами с поправкой на множественное сравнение выделен серой рамкой

Сравнение ССП абстрактных существительных. Сравнение ССП на предъявление абстрактных слов после нейтрального и негативного прайма не выявило статистически достоверных различий.

Обсуждение

Ранние этапы обработки информации. При коротком интервале между началом прайма и началом цели (SOA) использование негативной валентности прайма или непосредственное предъявление увеличивает амплитуду P1 и N1 компонента в затылочно-теменной области [5]. Причем этот эффект более выражен у высокочастотных слов [6]. Это объясняется преимуществом обработки негативных слов в затылочно-теменной области в связи с более высокой биологической значимостью. В нашем исследовании более длительный интервал, связанный с вовлечением произвольных механизмов умственной деятельности, вызвал преднастройку лобных механизмов произвольного внимания.

Поздние этапы обработки информации. Основные изменения ССП на позднем этапе связаны с негативной волной N400 и поздней позитивной волной LPP [2]. При позитивном прайминг-эффекте амплитуда N400 уменьшается, и это трактуется как облегчение лексико-семантической интеграции [7]. LPP связывают с процессами эмоциональной активации и оценки [8]. В нашем случае в центральном отведении наблюдали замедление N400 после прилагательного с негативной валентностью. Поскольку данная область мозга связана со структурами лимбической системы, можем предположить, что увеличение латентности связано с наложением эмоциональных оценочных процессов на семантические. Подобная интерференция наблюдается только при обработке конкретных слов. Нейронные сети, репрезентующие абстрактные слова, по всей видимости, гораздо лучше защищены от аффективных воздействий.

Выводы. Произвольные механизмы мыслительной деятельности в лобных и центральных отделах помогают усилить произвольный контроль над эмоционально окрашенной информацией и регулируют интерференцию между семантическими процессами и эмоциональной оценкой.

Литература

1. *Крутенкова Е.П. и др.* Влияние эмоциональных изображений на решение когнитивных задач // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 1 (21). С. 129–145.
2. *Марченко О.П.* Электрические потенциалы мозга, связанные с категоризацией названий одушевленных и неодушевленных объектов // Экспериментальная психология. 2010. Т. 3, № 1. С. 5–29.
3. *Bargh J.A. et al.* The generality of the automatic attitude activation effect // J. Personality and Social Psychology. 1992. V. 62. P. 893–912.
4. *Kiefer M.* Perceptual and semantic sources of category-specific effects: Event-related potentials during picture and word categorization // Memory and Cognition. 2001. V. 29, № 1. P. 100–116.
5. *Shengnan Y. et al.* Emotional noun processing: An ERP study with rapid serial visual presentation // PLOS ONE. 2015. P. 1–12. doi: 10.137/journal.pone.0118924.
6. *Scott G.G. et al.* Early emotion word processing: Evidence from event-related potentials // Biological Psychology. 2009. V. 80 P. 95–104.
7. *Van Petten C. et al.* Neural localization of semantic context effects in electromagnetic and hemodynamic studies // Brain and Language. 2006. V. 97 P. 279–293.
8. *Dien J. et al.* Parsing the late positive complex: Mental chronometry and the ERP components that inhabit the neighborhood of the P300 // Psychophysiology. 2004. V. 41. P. 665–678.
9. *Gramfort A. et al.* MNE software for processing MEG and EEG data // NeuroImage. 2014. V. 86. P. 446–460.
10. *Gramfort A. et al.* MEG and EEG data analysis with MNE-Python // Frontiers in Neuroscience. 2013. V. 7. P. 267. doi: 10.3389/fnins.2013.00267.
11. MNE [Электронный ресурс]. URL: https://www.nmr. mgh.harvard.edu/mne/stable/index.html.

О мировоззренческих аспектах исследований в области искусственного интеллекта

В.Ф. Пряхин

Российский государственный гуманитарный университет, Москва

На III Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» в 2013 г. нами была представлена концепция когнитивных исследований как важнейшего звена мировоззрения, необходимого для упреждения глобальных проблем современности, понимаемых как система [1]. Истекший со времени представления этого доклада период подтвердил верность основных выводов этого доклада, а именно: 1) негативные последствия воздействия глобальных проблем на мировое сообщество усугубились; 2) научно-технические исследования продолжали опережать их мировоззренческое осмысление; 3) продолжается нарастание энтропийного хаоса в системе международных и межчеловеческих отношений; 4) мировое сообщество показывает неспособность развиваться по рекомендуемым научным сообществом сценариям и модулям устойчивого развития; 5) локомотивом научно-технического прогресса по-прежнему остаются прикладные военно-технические разработки, причем когнитивные исследования занимают в них все более и более значимое место.

Действие упомянутых выше тенденций грозит международному сообществу глобальным коллапсом. Дальнейшее развитие естественно-научных исследований и когнитивных исследований в области искусственного интеллекта все более настоятельно требует выработки логичного целостного междисциплинарного представления о целях и перспективах развития человечества, глобального видения сути нашей цивилизации и смысла человека как средства материи познать самое себя, нового мировоззрения, основанного на осмыслении передовых достижений когнитивных исследований.

В предложенной на III конференции концепции такого мировоззрения центральное место занимает мысль о *смене биологического вида Homo sapiens* как *материального носителя разума*. Эта идея была сформулирована нами на Втором Всесоюзном симпозиуме по проблеме искусственного увеличения видовой продолжительности жизни (Москва, 1980 г.) [2] и с тех пор была повторена в ряде исследований отечественных и зарубежных ученых. По сути, она является базовой для мировоззренческого направления *трансгуманизма*, получившего в последние годы широкое развитие на Западе ([3, 4] и др.).

Таким новым носителем может являться *человек с увеличенной видовой продолжительностью жизни*. В отечественной науке мировоззрение, основанное на представлении о таком человеке, было развито в учении космистов (К.Э. Циолковский, В.И. Вернадский, А.Л. Чижевский, Н.Ф. Федоров) об «общем деле» человечества, призванном сплотить людей и предотвратить мировые войны.

Благодаря быстрому развитию и взаимодействию информационных технологий, биотехнологий, нанотехнологий и когнитивной науки, получивших собирательное название *NBIC-конвергенции* (по первым буквам областей: *N* – нано; *B* – био; *I* – инфо; *C* – когно) в последнее время все более реальные черты обретает и самая авангардная идея «общего дела» – «патрофикация» – о построении бесконечно близких к оригиналам антропоидентичных моделей, по определению Ф.М. Достоевского, «преждеживших».

Таким образом, в «общем деле» происходит синтез научной и религиозной парадигм мышления, а религия представляется *фольклорной концепцией научно-технического прогресса*. В политологическом плане этот феномен открывает реальные и оптимистические перспективы для преодоления цивилизационного раскола и формирования глобального гуманистического *общечеловеческого мировоззрения*.

Исследование когнитивных процессов – область познания, наиболее близкая к решению обозначенной К.Э. Циолковским задачи поработать над «общепринятыми во всех религиях символами», «глубоко, полнее расшифровать их с космической точки зрения» [5]. В течение длительного времени остается, однако, открытым вопрос о жизненном пространстве для существования огромного числа *аватаров* – антропоидентичных моделей «преждеживших». Такой вопрос был, в частности, задан Л.Н. Толстым Н.Ф. Федорову, и вот уже в течение более чем ста лет он остается без убедительного ответа.

Опубликованные со времени III конференции результаты научных исследований позволяют дать совершенно новые ответы на вопрос Л.Н. Толстого. Этот ответ следует, на наш взгляд, искать в решении проблемы *третьей сигнальной системы* общения между людьми. Концепция такой системы общения в отечественной науке была представлена И.А. Ефремовым в научно-фантастическом произведении «Туманность Андромеды» [6]. В 2015 г. американский программист и предприниматель, один из разработчиков и основателей социальной сети Facebook Марк Цукерберг уже достаточно конкретно высказался о возможности *телепатии* как средства общения между людьми без первой и второй сигнальных систем. «Я верю, что однажды мы будем способны посредством технологий напрямую посылать друг другу мысли во всей полноте их содержания, – написал Цукерберг в ответ на вопрос о дальнейших планах и перспективах Facebook. – Вы просто сможете о чем-то подумать, и ваши друзья незамедлительно воспримут вашу мысль» [7].

В научном докладе исследователей Дюкского университета (Duke University) в США содержится информация о том, что ученым этого университета удалось добиться *передачи сигналов из мозга одной подопытной крысы в мозг другой*, которая

стала выполнять задания по сигналам, подававшимся первой крысе [8]. Известен также эксперимент передачи отдельных слов («привет», «пока») методом *транскраниальной магнитной стимуляции* (ТМС). Осенью 2014 г. посредством ТМС участники эксперимента в одной из лабораторий Индии смогли мысленно передать эти слова участникам эксперимента во Франции [9].

На 2015 г. перспектива обретения людьми возможностей телепатического общения оценивается специалистами как весьма отдаленная, но вполне реальная. В печать просочились сведения о том, что военные эксперты уже приступили к созданию *телепатического шлема*, который сделает возможным процесс обмена электрическими сигналами [10, 11]. Это значит, что через некоторое время, скорее всего при жизни нынешнего поколения, *телепатическое общение между людьми* станет реальностью, а государства, овладевшие этими средствами раньше других, получат в свои руки рычаги политического воздействия на другие государства и все международное сообщество.

Но что это значит с точки зрения эволюции Гомо сапиенса и перспектив человечества в целом? Ведь если люди получат возможность читать мысли друг друга, то весьма быстро наступит момент, когда они утратят свои индивидуальности. У них не будет друг от друга никаких тайн. Не будет и никаких причин для ограждения этих тайн. Старые и больные получат возможность переносить свой интеллектуальный и эмоциональный багаж в тела молодых, молодые будут таким образом получать образование и практические навыки без долгих лет изнурительный учебы. Люди со временем станут думать одинаково, принимать одни и те же самые лучшие в данной ситуации решения. Исчезнет необходимость и целесообразность в существовании множества индивидов. В итоге этого процесса антропогенеза место многочисленного *полиндивидуального человечества* займет одно Сверхсущество – некая *моноличность*, объединяющая индивидуальности всех «прежде живших». В этом существе будет сконцентрирована вся информация, которую накопило, переработало и преобразовало человечество за всю историю своего существования. Каждый из нас найдет свое продолжение в этом Сверхсуществе, которое таким образом станет материальным воплощением своего умозрительного *фольклорного идеала* – всемогущего Бога.

Тем самым будет исчерпан смысл существования человечества. Возникнет необходимость в расширении сферы распространения разума во Вселенной на новом качественном этапе. Сейчас трудно предположить, какие формы для этого изобретет новый концентрированный Гомо сапиенс. Но если обратиться не в будущее, а в прошлое нашей цивилизации, то невольно приходишь к выводу, что Первовзрыв, который в итоге положил начало человеческой цивилизации, был как раз результатом сознательного действия нашего же разума на более низких этапах своего развития в бесконечной Вселенной. Мы были, есть и всегда будем существовать во Вселенной, расширяя пределы нашего распространения в ней. Но для того чтобы процесс этого распространения не был безысходно скучной процедурой путешествия луча света или безличностной радиоволны в эфире, разум вновь и вновь будет возвращаться к эмоционально насыщенной биологической форме Гомо сапиенс.

Таким образом, нам остается лишь повторить вывод К.Э. Циолковского о том, что будущего не следует бояться. Надо верно оценивать его как объективную реальность, избежать которой нет ни возможности, ни необходимости. При таком понимании возможно формирование необходимых социальных предпосылок для того, чтобы переход по триаде от *homo sapiens* к *homo cosmicus* и *homo sapiens novo* прошел безболезненно и без катастроф, чреватых самоуничтожением разума, носителем которого является наша цивилизация и каждый человек, живущий на Земле.

Литература

1. *Пряхин В.Ф.* О мировоззренческих аспектах естественно-научных исследований когнитивных процессов // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2013 : труды III Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2013. С. 126–128.

2. *Пряхин В.Ф.* Место проблемы искусственного увеличения видовой продолжительности жизни в марксистской классификации наук // Искусственное увеличение видовой продолжительности жизни : 2-й симпозиум : тезисы докладов / акад. Н.П. Дубинин (ред.). М. : Наука, 1980. С. 44. (*Pryakhin V.F.* The place of the problem of the artificial prolongation of the specific lifespan in the Marxist classification of sciences // Rejuvenation : Official Journal of the International Association of the Artificial Prolongation of the Human Specific Lifespan. 1982. V. 10, № 2. P. 39).

3. *Bostrom N.* Existential Risks. Analyzing Human Extinction Scenarios and Related Hazards // J. Evolution and Technology. 2002. V. 9, № 1.

4. *Roco M., Bainbridge W., (eds).* Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science. Arlington, 2004.

5. *Циолковский К.Э.* Грезы о Земле и небе : научно-фантастические произведения. Тула : Приокское книжное издательство, 1986.

6. *Ефремов И.А.* Туманность Андромеды. М. : Молодая гвардия, 1958.

7. *Dewey C.* Mark Zuckerberg says the future of communication is telepathy. Here's how that would actually work // The Washington Post. 2015. July 1.

8. *Pais-Vieira M., Lebedev M., Kunicki C., Wang J., Nicolelis M.A.L.* A Brain-to-Brain Interface for Real-Time Sharing of Sensorimotor Information // Sci. Rep. 2013. V. 3. P. 1319. doi: 10.1038/srep01319.

9. *Iozzio C.* Scientists Prove That Telepathic Communication Is Within Reach. An international research team develops a way to say "hello" with your mind // Smithsonian.com. October 2, 2014. URL: http://www.smithsonianmag.com/innovation/scientists-prove-that-telepathic-communication-is-within-reach-180952868/?no-ist.

10. Американское агентство DARPA испытало солдат-роботов // Интернет-портал Института информационных технологий г. Екатеринбурга. Новости. 29.01.2013. URL: http://www.nakanune.ru/news/2013/1/ 29/22298778/.

11. *Piore A.* The Army's Bold Plan to Turn Soldiers Into Telepaths. The U.S. Army wants to allow soldiers to communicate just by thinking. The new science of synthetic telepathy could soon make that happen // Discover. April, 2011. URL: http://discovermagazine.com/2011/apr/15-armys-bold-plan-turn-soldiers-into-telepaths.

Анализ молекулярной структурно-функциональной архитектуры нейрона как базового элемента когнитивных систем

А.С. Ратушняк, А.Л. Проскура, Т.А. Запара

Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН, Новосибирск
ratushniak.alex@gmail.com

Анализ работы мозга направлен как на создание новых архитектур информационных устройств, так и на коррекцию работы биологических систем в норме и при патологиях. При этом такой анализ многоуровневых информационных систем часто ограничивается только верхним уровнем их организации, что представляется важным, но недостаточным. Упускаются из вида те физические явления, которые обуславливают возникновение в молекулярных системах информационного процесса, ведущего к формированию зоны устойчивости таких комплексов (к возникновению жизни) и в конечном счете к процессам, определяемым как когнитивность. Во многом это обусловлено методологическими проблемами при интеграции гуманитарных и естественнонаучных подходов в изучении когнитивных процессов. Проистекает это из самого понятия когнитивности, которое в области гуманитарных наук обычно определяют как познание, изучение, осознание, память, внимание, психомоторная координация, речь, гнозис, праксис, счет, мышление, ориентация, контроль высшей психической деятельности и планирование и т.д.

При этом, естественно, упускаются из вида физические основы и эволюционные истоки когнитивности, цепь причинно-следственных связей, которые привели к возникновению и развитию систем, обладающих такими функциями.

Эволюционные основы когнитивности. Жизнь как негэнтропийный информационный процесс

Можно предположить, что когнитивность как физическое явление возникла из базовых свойств достаточно простых молекулярных систем – протоклеток. Основным свойством таких молекулярных комплексов была, видимо, возможность увеличения структурно-функциональной упорядоченности, т.е. уменьшение внутренней энтропии открытых систем на основе информационных процессов. Такая упорядоченность может возникать вследствие использования информационных процессов для предсказания будущего состояния среды. Это дает возможность приобретения системой дополнительной энергии и избегания условий ее потери. Негэнтропийный принцип, связывающий энтропийные и информационные процессы, формулировался многими авторами (например, [1–3]).

Согласно этому принципу информация может вносить отрицательный вклад в энтропию. То есть негэнтропия может переходить в информацию и обратно:

$$N \leftrightarrow I.$$

$$S = k \ln W,$$

где S – мера упорядоченности системы; W – термодинамическая вероятность; k – постоянная Больцмана; $k = 1{,}38 \cdot 10^{-16}$ эрг·град$^{-1}$, или $3{,}31 \cdot 10^{-24}$ энтропийных единиц (э. е.).

Можно предположить, что при возникновении первичных клеток, микробиот, в стартовой точке развития таких систем могли флюктуационно формироваться предельно простые молекулярные конструкций уже с некоторым «запасом», избытком упорядоченности негэнтропии N. Внешнее воздействие на такую систему приводило к уменьшению этой упорядоченности, и суммарная негэнтропия становилась равна:

$$\sum N = N - \Delta N + I.$$

При этом если такое событие запоминалось образованием ассоциативной связи между молекулами, воспринявшими воздействие, – «рецепторами» и выполнившими некоторое действие – «эффекторами», то изменение одной из молекул становилось сигнальным, т.е. несущим информацию I. При этом приобретенная информация могла в дальнейшем использоваться молекулярной системой для уменьшения энтропии с некоторым коэффициентом K_i, создавая дополнительный запас негэнтропии («прибавочная стоимость»):

$$I \rightarrow N \cdot K_i.$$

При следующем взаимодействии с таким фактором-сигналом он вызывал реакцию, опережающую последующее событие, и система реагировала по такому ранее зафиксированному алгоритму. Такая «микробиота» либо избегала потери упорядоченности (с затратой энергии), либо приобретала дополнительную энергию (например, поглощением энергоемких продуктов). То есть подобная молекулярная система, по сути, могла выполнять прогностические функции. Молекулярные системы, в которых такие межмолекулярные связи приводили к сохранению N или ее увеличению, попадали в зону повышенной устойчивости (т.е. фильтровались «естественным отбором»). Вероятно, мог устанавливаться баланс между затратами на приобретение информации и негэнтропией системы. При этом молекулярные комплексы с положительным балансом накапливались и постепенно совершенствовались на основе обратных связей со средой. Вероятно, на основе примерно такого принципа возникли первичные молекулярные системы, послужившие основой эволюционного процесса. Системы с более эффективными и развитыми рецепторными молекулярными ансамблями приобретали преимущество, и на этой основе уже в этих протоклетках формировались подпрограммы, которые потом, вероятно, стали базой позна-

вательной мотивации. Совершенствование эффекторных систем привело, вероятно, к становлению пищевой и оборонительной мотиваций и в целом к формированию гомеостатических свойств.

По сути, такие функции неявно присутствуют даже в простой модельной системе – «демоне Максвелла». Энтропия в этой модели понижается в результате детекции (рецепции) перемещающейся частицы, анализа ее энергии и прогноза ее будущего положения в пространстве. То есть для открывания канала между отсеками в нужное время и в нужном месте.

Молекулярные микробиоты, возникшие, по существующим представлениям, почти 4 млрд. лет назад, 3,5 млрд. лет (до кембрийского периода) совершенствовались и усложнялись, и только около 500 млн. лет назад произошло создание многоклеточных организмов, объединение клеток в сообщества. При этом, естественно, возникла специализация, появились клетки, ориентированные на обработку информации, и в итоге произошло образование специализированного органа – мозга.

Увеличение количества простых молекулярных систем, их усложнение и иерархическое объединение привело к возникновению новых эмерджетных свойств, проявляющихся на более высоких уровнях и характеризуемых как когнитивность. При этом в основе по-прежнему лежит свойство понижения энтропии благодаря прогностике в результате информационных взаимодействий со средой.

Проблемы и перспективы ремоделирования когнитивных систем

Создание биологически инспирированных новых поколений информационных устройств, биотехнологических интерфейсов, биосенсоров, средств диагностики, профилактики и коррекции нейропатологий является наиболее актуальным направлением исследований и разработок в области нейронаук. При этом чрезвычайно важны знания об устройстве, архитектуре, принципах работы молекулярных информационных систем. Огромное количество работ, посвященных исследованиям нейронов, ориентированы в основном не на анализ информационных процессов, и обилие информации в них сводится к набору данных. При этом интеграция таких данных, перевод их в систему знаний не проводится в силу невозможности охватить все их многообразие. Поэтому очень важно формировать системы, которые бы позволяли представлять все эти данные не в виде текстов и цифр, а в более доступном для восприятия человека графическом виде (например, [4, 5]). Это, возможно, позволит вести разработку основных концепций работы нейронов и нейронных систем.

Перспективным представляется и другое направление работ в области создания информационных систем, обладающих когнитивными свойствами. В этом направлении основной вектор постепенно смещается к пониманию необходимости разработок и создания молекулярных моделей информационных устройств, ориентированных на архитектуру биологических прототипов. При этом ведутся поиски достаточно простых внутриклеточных информационных систем, возможно сохранившихся в процессе эволюции клетки [6, 7]. Начинать формирование этих систем целесообразно с создания молекулярной машины, подобной нейрону. В работах, близких к этому направлению, проводится молекулярное конструирование устройств, функционально подобных «демону Максвелла» [8–13]. Проводятся разработки, ориентированные на создание нейроподобных ядер как элементной базы будущих поколений нейроподобных информационных систем (проект IBM C2S2, программа создания систем нейроморфной электроники SyNAPSE под эгидой DARPA и др.).

Заключение

Таким образом, для успешного решения задач реинженеринга, создания новых архитектур информационных устройств, коррекции работы биологических систем при патологиях представляется необходимым создание теории и функциональной, молекулярно-информационной архитектуры клеток. По сути, все биологические объекты, от молекулярно-клеточного уровня и до уровня глобальных социальных комплексов, относятся к классу открытых систем с отрицательной энтропией. Возможность создания теории устойчивости таких систем вследствие информационных прогностических процессов, их моделей на данном этапе обусловлена существующим огромным массивом аналитических материалов, требующих теоретико-экспериментального анализа и конвергенции от уровня разрозненных данных к уровню знаний, теорий и комплекса технологий. При этом, учитывая преемственность принципов и свойств биологических систем от уровня к уровню, законов эмерджентности, создание модели молекулярно-информационной организации базовых систем (клеточный уровень) позволит в значительной мере применять ее и для анализа систем на более высоких уровнях. Такая теория, как и, например, формирование представлений о молекулярной основе передачи генетической информации, не являясь решением всех проблем, позволит целенаправленно решать базовые задачи бионейроинформатики. Разработка такой теории, естественно, требует дальнейших исследований и конвергенции усилий специалистов из широкого круга областей науки, интеграции гуманитарных и естественно-научных подходов в изучении информационных процессов в биологических системах.

Представленные в работе данные получены при выполнении базового проекта фундаментальных исследований РАН VI.35.1.5, интеграционного проекта президиума СО РАН № 136, гранта РФФИ 12-01-00639.

Литература

1. *Brillouin L.* Science and Information Theory. Academic Press, 1962. 351 p.

2. *Schrödinger E.* What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell. Cambridge : University Press, 1944. 92 p.

3. *Крушинский А.* Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия // Российский журнал когнитивной науки. 2015. Т. 2, № 1. С. 52–61.

4. *Tourette C., Li B., Bell R., O'Hare S., Kaltenbach L.S., Mooney S.D., Hughes R.E.* A large scale Huntingtin protein interaction network implicates Rho GTPase signaling pathways in Huntington disease // J. Biol. Chem. 2014. V. 289, № 10. P. 6709–6726.

5. *Проскура А.Л., Вечкапова С.О., Запара Т.А., Ратушняк А.С.* Реконструкция молекулярного интерактома в системе глутаматных синапсов // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2014. Т. 18, № 4/2. С. 1205–1218.

6. *Root-Bernstein M., Root-Bernstein R.* The ribosome as a missing link in the evolution of life // J. Theoretical Biology. 2015. V. 367. P. 130–158.

7. *De Bo G., Leigh D.A.* A molecular machine mimicking the ribosome: a molecule that makes molecules // Med. Sci. Paris, 2013. V. 29, № 5. P. 452-454.

8. *Toyabe S., Sagawa T., Ueda M., Muneyuki E., Sano M.* Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality // Nature Physics. 2010. V. 6. P. 988–992.

9. *Sandberg H., Delvenne J.C., Newton N.J., Mitter S.K.* Maximum work extraction and implementation costs for nonequilibrium Maxwell's demons // Phys. Rev. E. 2014. V. 90. DOI: 10.1103/PhysRevE.90.042119.

10. *Blanco V., Leigh D.A., Lewandowska U., Lewandowski B., Marcos V.* Exploring the Activation Modes of a Rotaxane-Based Switchable Organocatalyst // J. Am. Chem. Soc. 2014. V. 136. P. 15775–15780.

11. *Kreysing M., Keil L., Lanzmich S., Braun D.* Heat flux across an open pore enables the continuous replication and selection of oligonucleotides towards increasing length // Nature Chemistry. 2015. V. 7. P. 203–208.

12. *Peyrard M.* The design of a thermal rectifier // Europhys. Lett. 2006. V. 76, № 1. P. 49–55.

13. *Terraneo M., Peyrard M., Casati G.* Controlling the energy flow in nonlinear lattices: a model for a thermal rectifier // Physical Review Letters. 2002. V. 88. P. 094302.

Лингвистический эксперимент: in vivo vs. in vitro

Е.В. Рахилина

Школа лингвистики НИУ ВШЭ, Москва

Доклад обобщает методологический опыт работы лингвистов Московской лексико-типологической группы (MLexT), исследующих лексические единицы в разных языках в сопоставлении с целью построить типологию лексики: найти параметры семантического варьирования и универсальные модели, которые лежат в основе систематизации лексических значений естественного языка. На примере исследований признаковой лексики рассматриваются эксперименты, которые обычно лежат в основе таких сопоставительных работ. Они предполагают опрос информантов, которые соотносят «образцовый» носитель признака с соответствующей языковой единицей: носитель языка называет цвет специально окрашенной таблички, запах или вкус определенного образца, выделенный звук и проч.

Эта методика стала очень популярна благодаря работам Неймегенской группы Института им. Макса Планка (http://www.mpi.nl/) и восходит к знаменитой статье Берлина – Кея 1969 года (http://en.wikipedia.org/wiki/Basic_Color_Terms:_Their_Universality_and_Evolution), посвященной типологии так называемых базовых цветообозначений в языках мира. Апеллируя к конкретным эталонным экземплярам внеязыковой действительности, она дает эффект дискретности семантики изучаемых единиц и одновременно – сопоставимости для слов разных языков. Современные технические средства делают эти эксперименты зрелищными, и результаты кажутся все более убедительными.

Мы обсудим «узкие места» этого подхода, которые связаны не только с внеконтекстным (in vitro) представлением данных, но и с проистекающей из этого подменой семантики живого языка навязанной человеком интерпретацией внеязыковой действительности. Между тем, как известно, внеязыковая действительность не может служить адекватной моделью для семантики – простейшим примером их неконгруэнтности может служить симметричность логического отношения ‘рядом’ в противовес асимметрии соответствующего отношения в обычном предложении с *рядом* и его аналогами на любом естественном языке. Материалом обсуждения будет семантика простейших физических признаков, таких как ‘острый’, ‘тяжелый’ или ‘мягкий’.

По нашему мнению, более непосредственный доступ к семантике дает обследование лексической сочетаемости интересующих нас лексических единиц по корпусам, которые с полным правом можно назвать корпусным экспериментом: именно корпус отражает семантику in vivo. Первичные результаты эксперимента затем могут служить основой так называемой фреймовой анкеты.

Пилотные лексико-типологические исследования такого рода, которые проводятся MLexT (не только для признаковой лексики, но и для глаголов движения, таких как *плавание* или *качание,* глаголов звука и др.), могут служить базой для дальнейших прогнозов семантического развития лексики.

Моделирование когнитивных способностей рыб, осваивающих лабиринты

В.Г. Редько[1], В.А. Непомнящих[2], Е.А. Осипова[2], Т.А. Шарипова[1], Г.А. Бесхлебнова[1]

[1]НИИ системных исследований РАН, Москва
[2]Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Борок, Ярославская область

В настоящей работе построены и исследованы компьютерные модели познавательных способностей достаточно простых животных, изучающих лабиринты. Строятся компьютерные модели накопления новых знаний и предсказательных способностей рыб, и сопоставляются результаты компьютерного моделирования с данными биологического эксперимента. При моделировании учитывается то, что в поведении животных постоянно присутствуют две противоположные тенденции: 1) поиск новой, непредсказуемой стимуляции и 2) стремление предсказывать результаты своего поведения [1–3]. Данная работа является продолжением наших предыдущих исследований [4].

Модели основаны на биологическом эксперименте навигации рыб данио рерио в двух типах лабиринтов.

1. Биологический эксперимент. Поведение рыб в лабиринтах

В биологическом эксперименте изучалось поведение рыб данио рерио в незнакомой им среде – в лабиринтах двух типов: в простом крестообразном лабиринте с 4 коридорами (рис. 1) и в более сложном лабиринте с 11 коридорами (рис. 2).

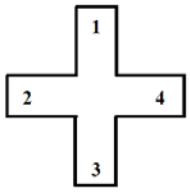


Рис. 1. Крестообразный лабиринт

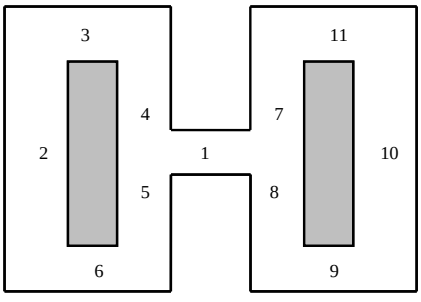


Рис. 2. Лабиринт с 11 коридорами. Серым показаны непрозрачные барьеры внутри левого и правого отсеков

В крестообразном лабиринте длина коридоров составляла 60 мм, ширина – 30 мм. В лабиринте с 11 коридорами длинные коридоры (2 и 10 на рис. 2) были длиной 90 мм, все коридоры были шириной 30 мм. Типичная длина рыб составляла 25 мм. Лабиринты были заполнены водой.

Для крестообразного лабиринта (рис. 1) значительная часть перемещений рыб между коридорами подчинялась простым правилам. Такие перемещения мы будем называть мотивами.

Самый заметный мотив – повторяющиеся челночные переходы между смежными коридорами, например 121212 или 141414…

Менее частый – повторяющиеся челночные переходы между противоположными коридорами: 131313 и 242424.

Изредка наблюдались последовательные переходы из одного коридора в другой, смежный по часовой стрелке (1234) или в противоположном направлении (3214) и переходы с «возвратом», например 12321 или 14341.

Кроме мотивов, у рыб изредка наблюдаются и случайные перемещения, например 231421.

Характерный пример последовательности посещаемых рыбой коридоров: 212121212323234223232323132323232321323123134123412341234232323232132143141214121212341212121212123132121212341234324242424131313124242431213241214123 12. Подчеркнуты цепочки, соответствующие указанным мотивам.

В лабиринте с 11 коридорами наблюдались следующие упорядоченные передвижения:

1. Челночные перемещения в противоположных направлениях вдоль какого-либо одного из достаточно длинных коридоров 2, 3, 6, 9, 10, 11 (но не 1). Достигнув конца коридора, рыба разворачивалась, двигалась в обратном направлении, доходила до противоположного конца коридора, снова разворачивалась и т.д.

2. Челночные передвижения, включающие два смежных коридора, например 232323…

3. Передвижения вдоль коридоров 4 и 5 или 7 и 8. В этих случаях рыба переходила, например, из коридора 4 в коридор 5, поворачивала в конце последнего, возвращалась в коридор 4 и т.д.: 454545… При таких передвижениях вход в коридор 1 игнорировался.

4. Передвижения 4171417… и 5181518…, в которых рыба поворачивала в коридор 1 всегда, когда проходила мимо него.

5. Обход какого-либо отсека по периметру, например 2345623456…

Таким образом, в поведении рыб в обоих лабиринтах наблюдаются упорядоченные передвижения, подчиняющиеся определенным правилам. Модели движения рыб использовали закономерности этого движения.

2. Модели движения рыб, накопления ими знаний, формирования и использования предсказаний

В моделях рассматривалось движение агентов (модельных рыб) в рассматриваемых лабиринтах. Время t считалось дискретным, t = 0, 1, 2... Каждый такт времени агент находился в определенном коридоре. Модели изучались с помощью компьютерного моделирования. Для четкого выяснения количественных результатов зависимости обычно усреднялись по 10000 расчетам с разными генераторами случайных чисел.

2.1. Модели поведения рыб в крестообразном лабиринте

2.1.1. Модель накопления знаний

Была построена модель накопления рыбами знаний о коридорах. Считалось, что агент (модельная рыба) имеет определенное знание K_i о каждом из коридоров, $0 \le K_i \le 1$, i = 1, 2, 3, 4. Предполагалось, что в момент посещения агентом i-го коридора величина K_i становится равной 1, а для остальных коридоров величины K_i постепенно уменьшаются.

Кроме того, вводилась специальная возможность посещения агентом тех коридоров, в которых он давно не был. Это осуществлялось следующим образом. В данный такт времени t рассматривались знания обо всех коридорах K_i, и в следующий такт времени t + 1 агент с определенной вероятностью P_{choice} двигался в тот коридор, для которого величина K_i была минимальна. Это можно рассматривать как то, что рыба прикидывала, в каком из коридоров она максимально давно не была, и принимала решение двигаться в этот давно не посещавшийся коридор.

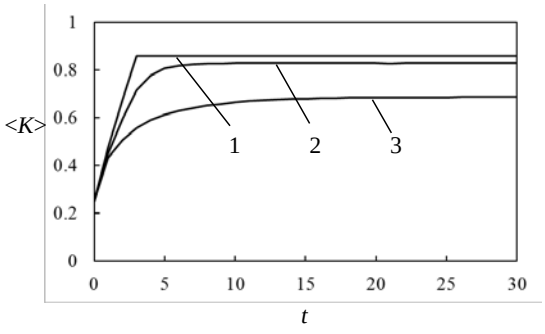


Рис. 3. Зависимости среднего по лабиринту значения знаний о коридоре <K> от времени t для разных вероятностей выбора P_{choice}. 1) P_{choice} = 1; 2) P_{choice} = 0,5; 3) P_{choice} = 0 (усреднено по 10000 разным расчетам)

Было проведено моделирование по данной модели. Основные результаты представлены на рис. 3, на котором показаны зависимости среднего значения по лабиринту знаний о коридоре <K> от времени t для разных вероятностей выбора P_{choice} того коридора, в котором агент давно не был, т.е. того коридора, для которого величина K_i минимальна. Характерное время постепенного уменьшения знаний о коридорах составляло 10 тактов времени.

Вследствие того, что знания о коридорах постепенно уменьшаются, среднее значение знаний не достигает максимального возможного значения, равного 1. Видно, что при больших вероятностях выбора P_{choice} тех коридоров, в которых агент давно не был, знания о лабиринте растут быстрее и достигают больших значений.

2.1.2. Модель предсказаний для движения рыб по крестообразному лабиринту

Для крестообразного лабиринта была также построена компьютерная модель, в которой рассчитывалась уверенность агентов в предсказаниях будущих ситуаций. Уверенность характеризовалась величиной, меняющейся от 0 до 1. Модель предполагала, что имеются исходные ситуации $\mathbf{S}_t$ (каждая ситуация соответствует коридору, в котором агент находится, число различных ситуаций равно числу коридоров и равно 4). В каждой ситуации агент может выполнять три действия $\mathbf{A}_t$. При выходе из коридора агент может: 1) повернуть в правый коридор, 2) пройти в противоположный коридор, 3) повернуть в левый коридор. Отметим, что рыбы так редко возвращаются в коридор, из которого только что вышли, что этим действием в модели пренебрегаем. При выполнении действия агент предсказывает, в какой ситуации $\mathbf{S}_{t+1}$ он дальше окажется (таких новых возможных ситуаций 4), если выполнит действие $\mathbf{A}_t$. В некоторой степени это предсказание подобно формированию простого акцептора результата действия в теории функциональных систем П.К. Анохина [5].

Далее агент определяет, сбылось ли его предсказание. Если предсказание сбылось, то уверенность в данном предсказании увеличивается, если предсказание не сбылось, то такая уверенность уменьшается. Таким образом, формируются уверенности в предсказании конечного элемента цепочки $\{\mathbf{S}_t, \mathbf{A}_t\} \rightarrow \mathbf{S}_{t+1}$.

В модели была введена следующая эвристика. Предполагалось, что, когда уверенность агента в текущем предсказании меньше определенного порога *Th*, агент стремится повторить только что пройденный маршрут, т.е. агент из того коридора, в котором он в данный момент времени t находится, возвращается в тот коридор, в котором он был в предыдущий момент t–1. А если уверенность агента в текущем предсказании больше порога *Th*, то агент совершает случайное действие. Данная эвристика соответствует отмеченным выше двум противоположным тенденциям: 1) стремлению достоверно предсказывать результаты своего поведения и 2) поиску новой, непредсказуемой ситуации.

Множество уверенностей для всех возможных цепочек $\{\mathbf{S}_t, \mathbf{A}_t\} \rightarrow \mathbf{S}_{t+1}$ запоминалось агентом. Кроме того, считалось, что уверенности в предсказании ожидаемого результата для всех цепочек $\{\mathbf{S}_t, \mathbf{A}_t\} \rightarrow \mathbf{S}_{t+1}$ все время немного уменьшаются.

Также предполагалось, что, когда агент делает предсказание для данного канала и действия, он предсказывает ожидаемый результат действия в соответствии с имеющимися у него уверенностя-

ми такого предсказания: для уверенностей, близких к 1, он однозначно предсказывает результат, а для малых уверенностей он предсказывает результат вероятностно.

Основные параметры расчета в компьютерной модели были таковы: типичное увеличение/уменьшение уверенности при правильном/неправильном предсказании составляло 0,3, порог *Th*, с которым сравнивается уверенность предсказания, равен 0,9, характерное время уменьшения всех уверенностей составляло 200 тактов времени.

Характерный пример последовательности посещаемых агентом коридоров таков: 434343424242 434141412121212434131313131212323232323231312323434343131312123243434313141414141424242424212121213131313141434343432323232321212123232323.

Как и для реальных рыб, подчеркнуты цепочки, соответствующие отмеченным выше мотивам. Видно, что последовательности посещаемых коридоров для модельных агентов и для реальных рыб аналогичны друг другу.

Зависимость от времени t суммарной уверенности в предсказаниях для всего лабиринта A_S показана на рис. 4.

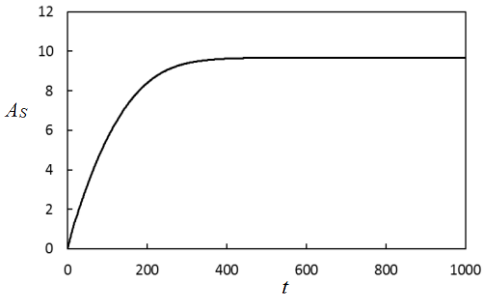


Рис. 4. Зависимость суммарной уверенности агента в предсказаниях для всего лабиринта A_S от времени t (усреднено по 10000 разным расчетам)

Отметим, что для каждого коридора и каждого действия только одно предсказание будущей ситуации является правильным. Поэтому максимально возможное число правильных предсказаний равно суммарной уверенности для всего лабиринта. С учетом числа коридоров и действий для всех возможных цепочек $\{\mathbf{S}_t, \mathbf{A}_t\} \rightarrow \mathbf{S}_{t+1}$ это число равно $4 \cdot 3 = 12$. Это максимально возможное значение суммарной уверенности в предсказаниях не достигается из-за того, что все уверенности постоянно немного уменьшаются (см. рис. 4).

2.2. Модель поведения рыб в лабиринте с 11 коридорами

Лабиринт с 11 коридорами значительно сложнее крестообразного лабиринта, и для этого лабиринта была построена гипотетическая модель, в которой была представлена схема формирования уверенностей рыб в предсказаниях будущих ситуаций и использования этих предсказаний. Гипотетическая модель предполагает, что после определенного освоения лабиринта рыба способна сформировать некоторые обобщенные понятия, характеризующие места в этом лабиринте (см. рис. 5). Считаем, что эти понятия соответствуют 8 ситуациям $\mathbf{S}_t$, в которых агент может быть в рассматриваемый момент времени t. Эти понятия таковы: самый западный/восточный коридор (1 и 8 на рис. 5), северный/южный проход в западном/восточном секторе лабиринта (2, 3, 6 и 7) и участки возле короткого коридора в западном и восточном секторах (4 и 5). Агент может выполнить следующие четыре действия $\mathbf{A}_t$: двигаться на север, юг, запад, восток.

В этой модели предполагается, что модельная рыба уже хорошо освоила лабиринт, т.е. агент уже имеет сформированные знания K_i для всех восьми ситуаций и уверенности в предсказаниях для всех возможных цепочек $\{\mathbf{S}_t, \mathbf{A}_t\} \rightarrow \mathbf{S}_{t+1}$. Используя эти знания K_i и уверенности, агент может создать план движения к месту, для которого величина K_i минимальна.

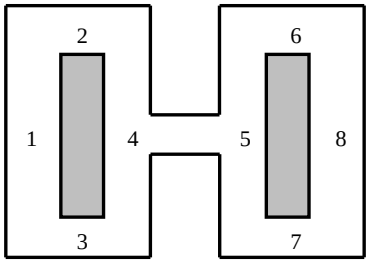


Рис. 5. Лабиринт с 11 коридорами. Ситуации 1–8 соответствуют рассматриваемым обобщенным понятиям

Было смоделировано формирование такого плана для следующего примера: исходно агент находится в самом западном коридоре (т.е. в ситуации 1), а целевая ситуация (для которой величина K_i минимальна) – это ситуация 8. Следовательно, агент должен самостоятельно сформировать план движения из исходной ситуации 1 в целевую ситуацию 8.

Агент формирует этот план следующим образом. Сначала агент начинает анализировать такие ситуации (6 и 7) и действия, в результате которых он может попасть в целевую ситуацию 8. Затем агент анализирует ситуации и действия, в результате которых может попасть в пред-целевые ситуации 6 и 7, и так далее. Таким образом, агент начинает анализ от целевой ситуации 8 и последовательно анализирует все возможные пути достижения этой ситуации до тех пор, пока его анализ не приведет к способу выхода из исходной ситуации 1.

В результате у агента создается простая база знаний, которая характеризует возможные пути достижения цели. Наконец, используя эту базу данных, агент формирует план движения. В некоторых ситуациях существует несколько возможных действий, приближающих агента к цели; в рассматриваемом случае два возможных варианта движения к цели имеются в ситуации 1 и в ситуации 5. В таких ситуациях агент при планировании случайно выбирает одно из возможных действий.

Приведем пример плана движения к целевой ситуация в рассматриваемом случае. В ситуации 1

агент движется на север и доходит до ситуации 2, затем он движется на восток и попадает в ситуацию 4, далее он движется на восток в ситуацию 5, затем он перемещается на север и попадает в ситуацию 6, и, наконец, агент движется на восток и достигает целевой ситуации 8. Процессы формирования этого и других подобных планов наблюдались при компьютерном моделировании.

Заключение

Таким образом, были разработаны и исследованы модели движения рыб, накопления ими знаний, формирования и использования прогнозов. Наиболее интересной моделью является гипотетическая модель формирования простой базы знаний и планирования движения к цели. Возможно, что такое планирование является слишком сложным для рыб. Однако аналогичная модель может быть использована для новокаледонских ворон, которые действительно мысленно формируют план последовательных действий, реализующий сложное поведение, используя полученные ранее знания о частях этого сложного поведения [6]. Причем, как ясно из экспериментов [6], вороны действительно предсказывают результаты своих конкретных действий, т.е. мысленно формируют (и используют) знания о цепочках $\{\mathbf{S}_t, \mathbf{A}_t\} \rightarrow \mathbf{S}_{t+1}$.

Примечательно, что мы вполне можем рассматривать и сходное планирование сложного поведения человеком. Более того, использование прогнозов очень интересно в контексте предложения использования системы логических правил предсказания в качестве одной из основ математики [7]. Следовательно, мы можем анализировать когнитивные процессы формирования и использования прогнозов на разных эволюционных уровнях: от рыб до человека.

Литература

1. *Inglis I.R., Langton S., Forkman B., Lazarus J.* An information primacy model of exploratory and foraging behaviour // Animal Behaviour. 2001. V. 62, № 3. P. 543–557.

2. *Inglis I.R., Forkman B., Lazarus J.* Free food or earned food: a review and fuzzy model of contrafreeloading // Animal Behaviour. 1997. V. 53, № 6. P. 1171–1191.

3. *Непомнящих В.А.* Связь между автономным и адаптивным поведением у искусственных агентов и животных // Подходы к моделированию мышления / под ред. Редько В.Г. М. : УРСС, 2014. С. 9–28.

4. *Непомнящих В.А., Осипова Е.А., Редько В.Г., Шарипова Т.И., Бесхлебнова Г.А.* Модель навигации животных в лабиринтах // XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2014» с международным участием : сборник научных трудов. В 3 ч. Ч. 1. М. : НИЯУ МИФИ, 2014. С. 110–117.

5. *Анохин П.К.* Системные механизмы высшей нервной деятельности. М. : Наука, 1979.

6. *Taylor A.H., Elliffe D., Hunt G.R., Gray R.D.* Complex cognition and behavioural innovation in New Caledonian crows // Proceedings of the Royal Society B. 2010. V. 277, № 1694. P. 2637–2643.

7. *Turchin V.F.* A constructive interpretation of the full set theory // Journal of Symbolic Logic. 1987. V. 52, № 1. P. 172 –201.

Моделирование когнитивной эволюции – перспективное направление междисциплинарных исследований

В.Г. Редько

НИИ системных исследований РАН, Москва

В процессе когнитивной эволюции сформировалось мышление человека, которое используется в научном познании. В докладе характеризуется моделирование когнитивной эволюции, т.е. исследование этой эволюции путем построения и изучения математических и компьютерных моделей когнитивных способностей живых организмов разного эволюционного уровня. Особое внимание уделено междисциплинарным связям исследований когнитивной эволюции.

Почему моделирование когнитивной эволюции интересно и важно?

Во-первых, потому что это направление исследований непосредственно связано со следующими фундаментальными научными проблемами:

- Как в процессе биологической эволюции возникло мышление человека?
- Почему мышление человека, в том числе формальное логическое мышление, используемое в математических доказательствах, казалось бы, совершенно не связанное с внешним миром, применимо к познанию реальной природы?

Во-вторых, в настоящее время имеются серьезные научные заделы моделирования когнитивной эволюции, развиваемые в целом ряде направлений вычислительных наук. Например, это многочисленные работы по исследованию компьютерных моделей автономных агентов, отражающих свойства как живых, так и модельных организмов. Также очень интересные заделы развиваются и со стороны биологических исследований познавательных способностей животных.

В-третьих, моделирование когнитивной эволюции в будущем должно иметь широкие междисциплинарные связи:

- с основаниями науки, с основаниями математики,
- с теорией познания,
- с когнитивной наукой,
- с биологическими исследованиями,
- с научными основами искусственного интеллекта,
- с моделированием на стыке вычислительных наук и биологических экспериментальных исследований.

И, наконец, моделирование когнитивной эволюции нацелено на серьезное развитие научного миропонимания. Используя эволюционный подход, можно исследовать познавательные способности биологических организмов разного эволюционного уровня, анализировать, как и почему возникали эти способности, стремиться раскрыть причины их возникновения.

Резюмируя приведенные аргументы, можно сказать, что вполне возможно формирование новой научной дисциплины «Моделирование когнитивной эволюции».

Философские предпосылки исследований когнитивной эволюции, заделы этих исследований, начальные шаги моделирования когнитивной эволюции подробно характеризуются в книге [1].

Очертим междисциплинарные связи будущих исследований когнитивной эволюции.

Связь с основаниями науки, с основаниями математики

Моделирование когнитивной эволюции связано с основаниями науки, с основаниями математики. Это моделирование прямо нацелено на исследования эволюционных корней нашего логического мышления, того мышления, которое используется в научном познании. Исследование пути к логическому мышлению, причин возникновения тех когнитивных способностей, которые привели к мышлению, возможно, прояснит вопрос: почему наша логика такова, какова она есть?

Возможно также, что мы сможем хотя бы частично прояснить причины «непостижимой эффективности математики в естественных науках» [2]. Действуя упрощенно, мы можем догадываться о том, что у животных в процессе эволюции формировались такие когнитивные способности, которые помогали животным предвидеть будущие события в окружающем мире, предвидеть результаты своих действий. И более того, животные могли планировать свое поведение, направляя его на полезные для себя результаты (в определенной степени подобное планирование наблюдалось у новокаледонских ворон [3]). При планировании, естественно, должны были делаться определенные логические выводы. Те животные, которые мысленно планировали свое поведение лучше, чем другие, имели эволюционное преимущество. В процессе эволюции должны были выживать те животные, которые лучше рассуждали, более четко предвидели результаты своих действий. И способность к правильным выводам, способность к правильному прогнозированию должна была совершенствоваться в процессе биологической эволюции. Далее, экстраполируя результат биологической эволюции (пока чисто концептуально), можно думать, что способность делать обобщающие выводы с учетом связей между различными видами знаний и привела к тем способностям человека, которые используются в научном познании. Наиболее четкое обобщение делается в математике. Математик стремится к наиболее четким и наиболее общим утверждениям, т.е. к утверждениям, охватывающим наиболее общую область

применений. Образно говоря, можно сказать, что математика – далеко заэкстраполированный вперед инструмент познания внешнего мира, инструмент предвидения будущего. Но, конечно же, эти рассуждения пока чисто концептуальные. Для полноценного познания эволюционного пути к мышлению целесообразно опираться на биологические эксперименты и соответствующие математические и компьютерные модели.

Конечно же, не вся логика, используемая в научном познании, сводится к чисто дедуктивным доказательствам. В логике используются методы мышления как рассуждения – дедукция, индукция, абдукция, аналогии. В частности, абдукция есть правдоподобный вывод от частного к частному. Схематично абдуктивный вывод можно представить следующим образом: «Пусть имеется правило A→B (из A следует B) и известно, что имеет место событие B. Тогда по абдукции делаем заключение о том, что, быть может, имеет место и A. Этот метод рассуждений предназначен для поиска причин или объяснений наблюдаемых явлений и фактов. Абдукция выступает в двух ипостасях: 1) как познавательная процедура, служащая основанием для принятия гипотез; 2) как метод получения обобщающей выборки» [4].

Возвратимся к основаниям науки, основаниям математики. Хорошо сказано о методах научного познания, о методах поиска математических утверждений в книге А. Пуанкаре «Наука и метод» [5], в которой характеризуются методы математического творчества, подчеркивается роль озарений, догадок, интуиции при поиске новых математических утверждений.

Подчеркнем еще раз, что при создании научных теорий ученый не только делает логические выводы, но и стремится к тому, чтобы получить максимально общие результаты, стремится связать воедино уже известные результаты, теоремы, концепции и теории.

Связь с теорией познания

Исследования когнитивной эволюции интересны с философской, эпистемологической точки зрения – они нацелены на прояснение причин применимости человеческого мышления в познании природы. Более того, моделирование когнитивной эволюции может способствовать развитию естественно-научной основы (на базе конкретных моделей конкретных познавательных способностей биологических организмов) философской дисциплины – эпистемологии.

Связь с когнитивной наукой

Сейчас в когнитивной науке во многом ведут исследования специалисты с гуманитарным уклоном: лингвисты и психологи. Моделирование когнитивной эволюции могло бы приблизить когнитивную науку к точным наукам. *Более того, исследование когнитивной эволюции связано с наиболее глубокими и серьезными когнитивными процессами – процессами научного познания*. Так что моделирование когнитивной эволюции могло бы стать одним из наиболее важных и глубоких направлений в когнитивной науке.

Связь с вычислительными науками, связь с биологией

Заделы моделирования когнитивной эволюции со стороны вычислительных наук и со стороны биологии довольно подробно охарактеризованы в [1]. Здесь только подчеркнем, что работ на стыке моделирования и биологических исследований когнитивных способностей живых организмов сейчас явно недостаточно. При этом могло бы быть эффективное сочетание биологических экспериментов и теоретических моделей, аналогичное мощному сочетанию экспериментальной и теоретической физики.

Близкие работы по научным основам искусственного интеллекта

Такие работы включают исследования когнитивных систем роботов [6], изучение нестандартных логик [7, 8], исследование познавательных методов, используемых человеком [9, 10].

Изучение естественного интеллекта и моделирование когнитивной эволюции

Существует широкий круг исследований, посвященных изучению естественного интеллекта, попыткам моделирования мышления. Отметим некоторые из работ в этом направлении.

Ряд работ отечественных исследователей в этой области представлен в книге [11]. В ранней работе [12] была сделана очень интересная попытка моделирования мышления в чистом виде, строилась тщательно продуманная модель (на основе четкой теоретической проработки) того, как могли бы люди познавать закономерности незнакомого им мира, минимально специализированного для наших органов чувств.

Интересный подход к воссозданию интеллекта человеческого уровня был предложен в работе [13]. Было предложено создать такого интеллектуального робота, поведение которого было бы настолько «разумно», что люди могли бы выбрать этого робота президентом страны. Хотя с точки зрения анализа когнитивных способностей человека, используемых в научном познании, можно было бы подойти к воссозданию интеллекта человеческого уровня следующим образом. В работе М.Н. Вайнцвайга [14] анализировались модели автономных агентов, которые познают закономерности механики, наблюдая за столкновениями тел, например шаров. По мнению М.Н. Вайнцвайга, исследование таких автономных агентов в конечном счете нацелено на то, чтобы агенты могли прийти к самостоятельному открытию трех законов Ньютона. Ну, чем это не интеллект человеческого уровня (конечно, пока только в замыслах) – открытие законов природы?!

И можно представить, как мог бы развиваться «интеллект» автономного агента, чтобы агент смог прийти к уровню ученого [15]. У агента должна быть база знаний, должно быть стремле-

ние к получению новых знаний и к обобщению знаний, должна быть любознательность, направляющая агента к постановке вопросов о внешнем мире и решению этих вопросов путем постановки экспериментов. Агенты должны учитывать многочисленные связи между уже имеющимися знаниями. Должен быть коллектив агентов, исследующий внешний мир, и должны быть коммуникации между агентами. Должно быть самосознание агентов, эмоциональная самооценка результатов своей деятельности и стремление агента достигнуть наиболее высоких результатов в коллективе агентов. Агенты должны иметь стремление к получению наиболее ясных, четких и компактных знаний, таких как законы Ньютона или аксиомы Евклида. И конечно, агенты должны освоить возможности логических выводов, позволяющих получить многочисленные следствия законов и аксиом.

Понятно, что путь к интеллекту такого уровня весьма непрост, но все же он просматривается.

Итак, работы, нацеленные на моделирование мышления человеческого уровня, ведутся. Сравнивая эти работы с постановкой моделирования когнитивной эволюции, можно сказать, что исследования в этих двух направлениях взаимодополнительны: рассматривается либо верхний уровень (моделирование мышления), либо эволюционный путь к этому уровню (моделирования когнитивной эволюции).

Перспективы

Анализируя современные работы по моделям автономных агентов, можно заключить, что уже имеются отдельные маленькие элементы модельной картины когнитивной эволюции. Образно говоря, у нас уже есть некоторые совсем небольшие фрагменты картины, но мы еще не видим всей картины. Четкой последовательности серьезных, канонических моделей, которые показывали бы общую картину происхождения логического мышления, пока еще нет.

Тем не менее, как уже говорилось, моделирование когнитивной эволюции тесно связано с глубокими фундаментальными проблемами:

- Почему наше человеческое мышление применимо к познанию природы?
- Как возникло мышление в процессе биологической эволюции?

В настоящее время имеются мощные заделы моделирования когнитивной эволюции как со стороны вычислительных наук, так и со стороны биологических исследований.

Исследования когнитивной эволюции должны способствовать существенному развитию научного миропонимания. Также эти исследования имеют широкие междисциплинарные связи.

И уверенно можно утверждать, что моделирование когнитивной эволюции имеет серьезные перспективы.

Литература

1. *Редько В.Г.* Моделирование когнитивной эволюции : на пути к теории эволюционного происхождения мышления. М. : УРСС, 2015.

2. *Вигнер Е.* Непостижимая эффективность математики в естественных науках // Успехи физических наук. 1968. Т. 94, № 3. С. 535–546.

3. *Taylor A.H., Elliffe D., Hunt G.R., Gray R.D.* Complex cognition and behavioural innovation in New Caledonian crows // Proceedings of the Royal Society. B: Biological Sciences. 2010. V. 277, № 1694. P. 2637–2643.

4. *Тарасов В.Б.* Грануляция информации: основа мыслительных процессов и предпосылка создания интеллектуальных систем новых поколений // Подходы к моделированию мышления / под ред. Редько В.Г. М. : УРСС, 2014. С. 219–261.

5. *Пуанкаре А.* О науке. М. : Наука, 1990. (См. в этом сборнике трудов: книга «Наука и метод», глава III «Математическое творчество»).

6. *Станкевич Л.А.* Искусственные когнитивные системы // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2010» : лекции по нейроинформатике. М. : НИЯУ МИФИ, 2010. С. 106–160.

7. *Финн В.К.* О машинно-ориентированной формализации правдоподобных рассуждений в стиле Ф. Бэкона – Д.С. Милля // Семиотика и информатика. 1983. М. : ВИНИТИ. Вып. 20. С. 35–101.

8. *Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В.* Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. М. : Физматлит, 2008.

9. *Осипов Г.С.* Лекции по искусственному интеллекту. М. : УРСС, 2009.

10. *Anshakov O., Gergely T.* Cognitive Reasoning: A Formal Approach. Heidelberg [et al.] : Springer, 2010.

11. Подходы к моделированию мышления / под ред. Редько В.Г. М. : УРСС, 2014.

12. *Вайнцвайг М.Н., Полякова М.П.* Об одном подходе к проблеме создания искусственного интеллекта // Моделирование обучения и поведения. М. : Наука, 1975. С. 209–235.

13. *Chella A., Lebiere C., Noelle D.C., Samsonovich A.V.* On a roadmap to biologically inspired cognitive agents // Biologically Inspired Cognitive Architectures 2011 : Proceedings of Second Annual Meeting of the BICA Society / eds Samsonovich A.V., Johannsdottir K.R. Amsterdam [et al.] : IOS Press, 2011. P. 453–460.

14. *Вайнцвайг М.Н.* Мышление как механизм обучения организации поведения // Подходы к моделированию мышления / под ред. Редько В.Г. М. : УРСС, 2014. С. 203–218.

15. *Red'ko V.G.* Principles of functioning of autonomous agent-physicist // Biologically Inspired Cognitive Architectures 2012 : Proceedings of the Third Annual Meeting of the BICA Society / eds Chella A., Pirrone R., Sorbello R., Johannsdottir K.R. Heidelberg ; New York ; Dordrecht ; London : Springer, 2012. P. 265–266.

Моделирование языкового сознания на основе данных когнитивного эксперимента

Т.В. Романова

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород

В центре внимания данной публикации – когнемная модель вербального сознания. Под когнемой понимается фигура знания, представляющая собой постоянно текущий динамичный процесс взаимодействия пяти параметров: смысл – способ – слово (знак) – область – функция [1]. Основным классифицирующим признаком данной фигуры знания является непосредственная репрезентация явлений окружающего мира в особых языковых формах.

Способы задания и расшифровки смысла подразделяются на несколько групп: лингвистические (афоризм, аббревиатура, антоним, внутренняя форма слова, гипоним, гипероним, литота, метафора, оксюморон, омоним, пароним, перифраза, поговорка, полисемия, пословица, рифма, синоним, словосочетание, смена кода, фразеологизм); психологические (ассоциации); логические (дескрипции, дефиниция, импликация, множество, предикат, пропозиция, сравнение, суждение, фрейм); способы визуальной модальности (жест, образ, символ); фактологические (прецедентный текст, непрецедентный текст, имя автора, название произведения, персонаж, художественная деталь, событие, деталь биографии, цитата, топоним, псевдоним); научные (термин, формула) [1].

Область знаменует *когнитивный* переход от элементарных фигур на более высокий уровень знаний, к единицам языковой картины мира. С точки зрения относительной ценности единиц знания принято различать два их типа – знание-рецепт и знание-ретушь [3], использованные Ветлером применительно к когнитивному анализу текста. Первое несет существенное, важное, основное с точки зрения понимания содержания текста и его воздействия знание. Второе же, т.е. знание-ретушь, сообщает второстепенные, необязательные, фоновые сведения, которые при анализе текста, например по ключевым словам, могут свертываться, опускаться, не учитываться. При определении функции знания, «основного» или «вспомогательного», используются термины «рецепт» и «ретушь» соответственно.

Способы задания смысла в когнемах являются неотъемлемой частью языка и воспринимаются носителями языка на интуитивном, бессознательном уровне, т. е. существуют как естественные механизмы владения языком. Способ – это непосредственно связующее звено между смыслом и знаком, т. е. то, что позволяет объединить их в одно целостное понятие, которое является носителем определенных знаний о действительности. Отметим, что способ задания смысла может стать вспомогательным звеном в процессе декодирования содержания операции в когнайзере (когнемная модель вербального сознания), которая и осуществляет данную связь.

На современном этапе развития общества, науки и языка наблюдается постоянный рост базы данных, т. е. материалов для переработки информации сознанием. Из этого можно сделать ложное заключение, что способы задания смысла в когнемах увеличиваются прямо пропорционально материалу. В действительности, существуют многочисленные способы задания смысла, однако нет тенденции к увеличению их числа, хотя способы задания смысла, выраженного одним языковым знаком, могут варьироваться. Эта гипотеза была проверена в ходе когнитивного эксперимента, в котором когнемному моделированию была подвергнута область знания, «схваченная» лингвистическими терминами. На основе полученных данных была «заполнена» модель когнемы и выделены ее основные структурно-содержательные признаки как формата знания.

Для эксперимента были использованы базовые термины вузовского курса «Введение в языкознание». Знание этих терминов является обязательным для опрашиваемых (51 студент факультета гуманитарных наук НИУ ВШЭ Нижнего Новгорода), что предположительно должно было повысить эффективность эксперимента и снизить возможность неверного понимания определенных терминов, а значит, и вероятность ошибки при анализе полученных результатов. Данный эксперимент фиксирует активный режим работы когнайзера, от знака к смыслу.

Опрашиваемым были предложены две группы лингвистических терминов, значение которых они должны были объяснить письменно:

- грамматическое значение / грамматическая форма / грамматическая категория,
- лексема /семема /сема;
- билингвизм,
- редупликация,
- ономасиология,
- лексикология,
- мертвый язык.

Группы терминов формировались согласно способу задания смысла: первая группа терминов объединена таким вероятным способом задания смысла, как дефиниция, вторая – внутренней формой. Мы рассмотрели способы объяснения смысла предложенных терминов в лингвистических источниках и участниками эксперимента по параметрам: 1 – смысл, 2 – способ, 3 – знак, 4 – область, 5 – функция. В результате анализа терминологических источников были сделаны предположения о прототипе предполагаемых объяснений. Например: грамматическое значение – обоб-

щенное, отвлеченное значение, присущее не одной языковой единице, а целому классу единиц и имеющее в языке определенные средства выражения; грамматическая форма – языковой знак, в котором определенное грамматическое значение находит свое регулярное выражение; грамматическая категория – система противопоставленных друг другу рядов грамматических форм с однородными значениями [2].

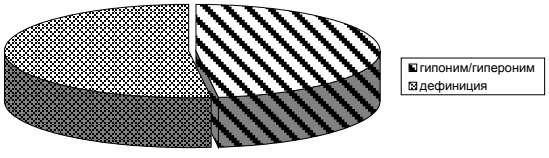
На основании анализа лингвистических справочников была сформулирована гипотеза, согласно которой дефиниция является наиболее характерным способом задания смысла для объяснения терминов. В то же время нельзя не принимать во внимание, что существуют иные способы задания смысла, которые могут использоваться участниками эксперимента. Например, понятие грамматического значения может быть объяснено с помощью конкретных примеров: 1) частеречная принадлежность, 2) отношения гипонима и гиперонима, 3) грамматическое значение, 4) языкознание, 5) ретушь. Данное определение можно считать верным, но нельзя однозначно определить точным и полным, так как в основу положен один частный признак, который не позволяет классифицировать грамматические значения как таковые. Приведем примеры параметризации объяснения терминов.

Грамматическое значение:

- 1) значение, выражающееся с помощью морфем, 2) дефиниция, 3) грамматическое значение, 4) языкознание, 5) рецепт;
- 1) значение, выражающееся словоизменительной морфемой, 2) дефиниция, 3) грамматическое значение, 4) языкознание, 5) рецепт;
- 1) значение, которое дополняет лексическое и выражается аффиксами, 2) дефиниция, 3) грамматическое значение, 4) языкознание, 5) рецепт.

Каждое сформулированное определение было проанализировано по параметрам: достоверность, область, функция, способ задания смысла. Например: ‘*значение, которое появляется у слова с изменением его грамматической формы’* – обоснованное определение, точная референция, функция-рецепт; ‘*значение, выражающееся с помощью морфем’* – обоснованное определение, но необходимо учитывать, что грамматическое значение может выражаться как аналитически, так и синтетически; возможная референция; функция-рецепт; ‘*значение числа, рода’* – необоснованное определение (приведен пример грамматической категории), неверная референция, функция-ретушь.

По способу определения смысла все ответы можно подразделить на две группы:



Для терминов второй группы в качестве способа задания смысла «показана» внутренняя форма слова: объяснение содержания термина через структурную и семантическую соотнесенность морфем.

В таблице, приведенной ниже, представлены объяснения внутренней формы терминов, а также возможные их определения. При объяснении терминов использовались статьи «Лингвистического энциклопедического словаря» [2].

Термин	Внутренняя форма	Значение
билингвизм	от bi – два и лат. lingua – язык	двуязычие
редупликация	от позднелат. reduplicatio – удвоение	повторение определённой части слова
ономасиология	нем. onomasiologie < греч. όνομα – имя + λόγος – учение	учение о языковом обозначении понятий и неязыковых объектов
лексикология	от греч. λεξικός – относящийся к слову и λόγος – учение	раздел языкознания, изучающий лексику

Представим пример параметризации объяснения значения терминов:

1) двуязычие, 2) внутренняя форма слова, 3) билингвизм, 4) языкознание, 5) рецепт;

1) повторение определенной части слова, 2) внутренняя форма слова, 3) редупликация, 4) языкознание, 5) рецепт;

1) наука об именах, 2) внутренняя форма слова, 3) ономасиология, 4) языкознание, 5) рецепт;

1) наука о лексике, 2) внутренняя форма слова, 3) лексикология, 4) языкознание, 5) рецепт.

1) язык, потерявший носителей, 2) внутренняя форма слова, 3) мертвый язык, 4) языкознание, 5) рецепт.

Внутренняя форма слова расценивается как наиболее вероятный, но не единственный способ задания смысла при объяснении этой группы терминов. Например, термины ***мертвый язык*** и ***редупликация*** могут быть объяснены через систему примеров.

Как показывают ответы участников эксперимента, наиболее очевидные способы интерпретации смысла термина ***билингвизм*** – это внутренняя форма, дескрипция и дефиниция. Дефиниция является наиболее частотным способом задания смысла, понятие ***билингвизм*** в этом случае раскрывается наиболее полно. Но вместе с тем этот способ не всегда является релевантным, точным. При формулировании дефиниции используется внутренняя форма слова, наиболее очевидно она прослеживается в таком определении, как «*ситуация двуязычия»*. Неточность дефиниции как способа задания смысла в данном случае связана с неоднозначным пониманием термина ***двуязычие***.

Большинство участников эксперимента определяют билингвизм как ‘*владение двумя языками’*. Такое определение может считаться верным, но если билингвизм объясняется как ‘*владение двумя неродными / иностранными языками’*, это уже ошибочное утверждение. Испытуемый в этом случае объясняет не термин ***билингвизм***, а термин ***двуязычие***. Это происходит из-за совпадения внутренней формы терминов.

Меньшая часть испытуемых при объяснении опиралась на такой способ задания смысла, как дескрипция, с опорой на внутреннюю форму слова.

С использованием структуры дескрипции даны более точные определения. Дескрипция позволяет объяснить значение термина на конкретном примере (*«например, ребенок, родившийся в России, переехал в Германию в возрасте 5 лет»*; «*ситуация, когда*», «*ситуация, при которой»*, «*ситуация, когда человек владеет двумя языками, которые являются родными для него*»). В таком случае значение термина определяется наиболее точно, однозначно, несмотря на то что дескрипция не предполагает в своей основе жесткого набора необходимых составляющих и признаков

На основании проведенного анализа можно сделать ряд выводов.

Хотя содержание не определяет способ задания смысла, но для каждого понятия существуют наиболее характерные и вероятные способы задания смысла.

Возможны комбинации способов задания смысла, выраженного одним языковым знаком. При этом какой-либо способ может быть определен как основной, и на его основе выстраивается структура толкования с использованием других способов. Для терминов «наиболее показаны» такие способы задания смысла, как дефиниция, дескрипция, внутренняя форма слова.

Возможно определить критерии иерархии способов задания смысла, а именно: полнота, точность, вариативность. В предложенной иерархии в ряде случаев дефиниция является наиболее точным способом. В своем большинстве определения, заданные с помощью дефиниции, соотносятся со словарным толкованием, т. е. представляют собой устоявшуюся и признанную формулировку. В то время как определения, образованные с помощью дескрипции, имеют в своей основе дефиницию, но в отличие от нее четко не структурированы. Один и тот же знак может быть истолкован по-разному, при этом все его объяснения соотносятся с одним и тем же способом задания смысла, т. е. одному способу соответствует несколько определений. В данном случае дефиниции и дескрипции могут соответствовать различные определения, так как эти способы предполагают выделение какого-либо отличительного признака, но данный признак может быть определен несколькими путями. С внутренней формой слова обычно соотносится одно толкование.

Литература

1. *Караулов Ю.Н., Филиппович Ю.Н.* Лингвокультурное сознание русской языковой личности. Моделирование состояния и функционирования. М., 2009. 336с.

2. Лингвистический энциклопедический словарь [Электронный ресурс] / В.Н. Ярцева, В.А. Виноградов, И.К. Сазонова [и др.]. М. : Советская энциклопедия, 1990. URL: http://www.tapemark.narod.ru/les/ (дата обращения: 24.02.2014).

3. *Wettler M.* Sprache, Gedächtnis, Verstehen. Berlin ; New York, 1980. 460 p.

Экспериментальное исследование и моделирование восприятия бистабильных объектов

А.Е. Руннова[1], В.В. Грубов[1,2], А.Е. Храмов[1,2], А.А. Короновский[2], М.К. Куровская[2]

[1] Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
[2] Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Мозг является одним из наиболее сложных и загадочных объектов для комплексных исследований, привлекая 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., и сочетание разнообразных подходов и проведение многопрофильных исследований зачастую предоставляет возможности для более глубокого понимания механизмов, лежащих в основе его динамики, и может открыть перспективные возможности в медицине и нейротехнологиях.

Визуальное восприятие часто изучалось с помощью неоднозначных изображений (бистабильных объектов) [4–6], хотя восприятие чередующихся образов было описано и другими методами [7–9]. Для понимания визуального восприятия и распознавания объектов восприятие бистабильных изображений является лишь одной, но весьма интересной задачей среди огромного количества различных аспектов. На сегодня основной механизм определения изображения не открыт полностью, однако хорошо известно, что восприятие является продуктом процессов в распределенной сети затылочной, теменной и фронтальной области коры головного мозга [10, 11]. Существует гипотеза, что переключение восприятия какого-либо бистабильного объекта связано с шумом, присущим системе нервных клеток [12–14], чье происхождение можно объяснить как результат случайных нейронных спайков [15, 16]. В таком случае внутренний шум будет играть решающую роль, как при восприятии неоднозначных изображений, так и в других областях принятия решений.

На сегодня предложено математическое моделирование восприятия бистабильного объекта в терминах простых стохастических процессов, таких как винеровские процессы [17–19]. В настоящее время наиболее важной проблемой для расчета и уточнения свойств подобного моделирования является нахождение подходов к измерению шумовых характеристик головного мозга, поскольку точное предсказание и оценка шума могут открыть большое количество новых возможностей как в исследовании функциональности мозга, так и в диагностике его патологий.

Настоящая работа посвящена непрямому экспериментальному измерению интенсивности шума мозга, генерируемого при восприятии неоднозначных образов. Для этой цели нами разработана теоретическая модель и предложена методика экспериментальной работы по косвенному измерению «когнитивного шума».

В экспериментальных исследованиях приняли участие 25 здоровых неоплачиваемых добровольцев, мужчин и женщин, в возрасте от 20 до 45 лет, обладающих нормальным или компенсированным до нормального зрением. В качестве неоднозначного образа была использована иллюзия куба Некера [20]. В рамках эксперимента использовалось $N = 16$ модификаций куба Некера с разной интенсивностью средних линий (рис. 1). Интенсивность I трех средних линий, сосредоточенных в левом внутреннем углу, была выбрана в качестве управляющего параметра и менялась в пределах [0; 1]. Интенсивность трех средних линий вблизи правого внутреннего угла была установлена как $(1 - I)$. Интенсивность контура куба Некера не изменялась и была равна 1.

В ходе эксперимента добровольцу предъявлялись 16 кубов Некера с различными I в случайной последовательности. Куб демонстрировался в виде черных линий на белом фоне на экране компьютера. Между предъявлениями различных кубов участнику показывались фоновые цветные «размытые» картинки для отвлечения внимания. Время предъявления куба Некера составляла 500–700 мс, пауза между двумя различными кубами составляла 1500–2000 мс. Всем участникам эксперимента была дана инструкция нажимать левую или правую клавишу на панели управления в зависимости от первого восприятия демонстрируемого объекта (соответственно крайний слева или справа куб на рис. 1).

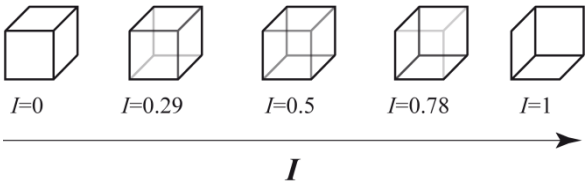


Рис. 1. Примеры иллюзий куба Некера, используемые в экспериментальной работе

В экспериментальной работе для организации визуального стимулирования и последующей записи данных было использовано программное и аппаратное оборудование «Энцефалан – ЭЭГР-19/26» («Медиком МТД»). После проведения записи экспериментальных данных для каждого из кубов, т.е. для каждого значения управляющего параметра I, была рассчитана вероятность узнавания данного куба как левого $P_l(I) = l(I)/(l(I) + r(I))$, где $l(I)$ и $r(I)$ – число нажатий на левую и правую кнопки соответственно.

Построение математической модели основано на подходе двух конкурирующих нейронных по-

пуляций [6, 21, 22], когда выбор испытуемым бистабильного объекта как ориентированного налево описывается с помощью динамической системы с биквадратичным потенциалом, обладающим двумя устойчивыми точками:

$$\dot{x} = -U'(x) + \xi(t), \quad (1)$$

где потенциальную функцию в общем виде можно записать как

$$U(x) = \frac{a_4}{4}x^4 + \frac{a_3}{3}x^3 + \frac{a_2}{2}x^2 + a_1 x. \quad (2)$$

Здесь устойчивые точки $x_{l,r}$ будут соответствовать крайнему левому и крайнему правому кубам Некера на рис. 1. Пользуясь математическими подходами, разработанными в теории катастроф, удаётся упростить выражение (2), переписав его в форме

$$U(x) = \frac{x^4}{4} - \frac{x^2}{2} + bx. \quad (3)$$

В данном случае, коэффициент b остается неизвестным и индивидуальным для каждого человека. Мы связали коэффициент b со следующим эффектом, наблюдаемым нами в эксперименте. Из объективного наблюдения понятно, что куб Некера с интенсивностью граней I = 0,5 испытуемый должен с одинаковой вероятностью воспринимать и как левый, и как правый. Однако в эксперименте оказалось, что это значение равновероятного куба обычно не равно 0,5 и достаточно плавает с величиной ΔI, с которой и был связан исходный параметр b = $\Delta I/\alpha$.

Переходя от уравнения (1) к записи уравнения в стохастической форме:

$$dX = -U'(x)dt + dW, \quad (4)$$

где $X(t)$ – случайный процесс, а $W(t)$ описывается винеровским процессом, получаем, что решение уравнения (4) может быть получено из уравнения Фоккера – Планка для плотности вероятности $\rho(x, t)$.

После некоторых математических выкладок мы получаем следующее теоретическое выражение для плотности вероятности $\rho(x, t)$:

$$\rho(x) = exp\left(-\frac{2U(x)}{D}\right). \quad (5)$$

Таким образом, можно теоретически предсказать, какова будет вероятность восприятия куба с интенсивностью I как левого:

$$\dot{P}_l = \int_{-\infty}^{0} \rho(x)dx. \quad (6)$$

Подводя итог из выражений (3), (5) и (6), можно утверждать, что теоретически предсказуемая вероятность выбора $\dot{P}_l$ является функцией трех параметров: $\dot{P}_l = \dot{P}_l(\Delta I, \alpha, D)$.

Значения всех индивидуальных параметров подбирались по каждому испытуемому методами наилучшего приближения, и на рис. 2 продемонстрированы результаты теоретического моделирования и экспериментальных измерений восприятия куба Некера с различными интенсивностями граней.

Хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных является убедительным доказательством адекватности предложенного подхода к количественной характеристике процессов когнитивной деятельности, связанной с визуальным восприятием неоднозначных изображений.

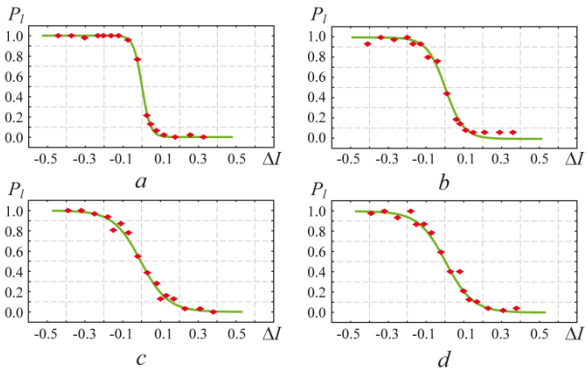


Рис. 2. Экспериментально измеренные зависимости вероятности восприятия иллюзии Некера как левоориентированного куба P_l (точки) и соответствующие теоретические приближения $\dot{P}_l$ (сплошные линии): *a* – испытуемый 10, D_p = 0,085; *b* – испытуемый 14, D_p = 0,175; *c* – испытуемый 3, D_p =0,25; *d* – испытуемый 17, D_p = 0,25.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-12-00224).

Литература

1. *Hramov A.E. et al.* Wavelets in Neuroscience. Heidelberg ; New York ; Dordrecht ; London : Springer, 2015. (Springer Series in Synergetics).
2. *Bear M.F., Connors B.W., Paradiso M.A.* Neuroscience : Exploring the brain. Woters Kluwer, 2015.
3. *Chavez M. et al.* // Physical Review Letters 104, 118701 (2010).
4. *Leopold D.A., Logothetis N.K.* // Trends in Cognitive Sciences 3, 254 (1999).
5. *Blake R., Logothetis N.K.* // Nature Reviews. Neuroscience 3, 13 (2002).
6. *Pisarchik A.N. et al.* // Biological Cybernetics 108, 397 (2014).
7. *Moore B.C.J., Gockel H.E.* // Philosopical transactions of the Royal Society B 367, 919 (2012).
8. *Carter O. et al.* // Current Biology 18, 1050 (2008).
9. *Zhou W., Chen D.* // Current Biology 19, 1561 (2009).
10. *Tong F., Meng M., Blake R.* // Trends in Cognitive Sciences 10, 502 (2006).
11. *Sterzer P., Kleinschmidt A., Rees G.* // Trends in Cognitive Sciences 13, 310 (2009).
12. *Huguet G., Rinzel J., Hupe J.-M.* // Journal of Vision 14, 1 (2014).
13. *Gigante G., Mattia M., Braun J., Giudice P.D.* // PLoS Computational Biology 5, e1000430 (2009).
14. *Moreno-Bote R., Rinzel J., Rubin N.* // Journal of Neurophysiology 98, 1125 (2007).
15. *Merk I., Schnakenberg J.* // Biological Cybernetics 86, 111 (2002).
16. *Deco G., Rolls E.T., Romo R.* // Progress in Neurobiology 88, 1 (2009).
17. *Heekeren H.R., Marrett S., Ungerleider L.G.* // Nature Reviews Neuroscience 9, 467 (2008).
18. *Wang X.-J.* // Current Opinion in Neurobiology 22, 1039 (2012).
19. *Pearson B. et al.* // Journal of Vision 14 (2014).
20. *Necker L.A.* // Philosophical Magazine. 3, 329 (1832).
21. *Laing C.R., Chow C.C.* // Journal of Computational Neuroscience 12, 39 (2002).
22. *Wilson H.R.* // Proceedings of the National Academy of Sciences 100, 14499 (2003).

Последовательный иерархический подход в задаче классификации аудиовизуальной информации

А.В. Савченко[1], В.Р. Милов[2]

[1]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород
[2]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В последнее время появляется все большее число методов классификации аудиовизуальной информации (изображений, речи), в которых для представления анализируемых объектов используются несколько уровней детализации [1, 2]. Известно, что применение глубинных (deep) нейронных сетей свертки [3], пирамид признаков (таких как дескриптор PHOG, Pyramid HOG (Histogram of Oriented Gradients) [4]), иерархической временной памяти [1], теории активного восприятия [5] привело к повышению точности и надежности классификации по сравнению с традиционными подходами [6]. Повышенное внимание многих исследователей к иерархическому подходу связано с хорошо известной характерной для интеллекта человека иерархической обработкой аудиовизуальной информации при решении им разнообразных задач (естественного) распознавания образов [1]. Чаще всего в таких методах происходит *одновременное* сопоставление признаков входного объекта и эталонов из базы данных на каждом уровне иерархии, что зачастую приводит к невозможности реализации сложных иерархических алгоритмов в режиме реального времени [4]. Например, вычислительная сложность обработки дескриптора PHOG обычно в несколько раз превышает сложность сопоставления традиционных дескрипторов HOG [7]. На преодоление этого недостатка и направлена настоящая работа. В ней в развитие предыдущей статьи авторов [2] предложено выполнять анализ детализированного представления входных объектов только при невозможности принятия достаточно надежного решения на предыдущих уровнях.

Задача классификации аудиовизуальной информации

Задача классификации состоит в том, чтобы поставить в соответствие входному объекту X (изображению, фрагменту речевого сигнала) один из $C > 1$ заранее точно не определенных классов [6]. Предполагается, что для обучения системы доступна база данных, содержащая $R \ge C$ эталонных объектов (прецедентов) $\{X_r\}$, $r \in \{1, ..., R\}$, где класс r-го эталона $c(r) \in \{1, \ldots, C\}$ считается известным. Для решения задачи входной объект X с помощью известной процедуры сегментации (например, разбиения на фреймы фиксированной размерности или наращивания областей) [6] представляется в виде последовательности из K сегментов $X(k)$, каждому из которых ставится в соответствие совокупность из $n(k)$ векторов значений признаков $\mathbf{x}_j(k)$ фиксированной размерности M. Аналогично эталоны X_r разбиваются на K_r частей и k-й сегмент r-го эталона $X_r(k)$ определяется как последовательность из $n_r(k)$ векторов признаков $\mathbf{x}_j^{(r)}(k)$ размерности M. В рамках модели кусочно-однородного объекта [8] предполагается, что векторы $\mathbf{x}_j(k)$ и $\mathbf{x}_j^{(r)}(k)$ являются реализациями случайных векторов, сегменты $X(k)$ – простые выборки (независимых одинаково распределенных) векторов $\mathbf{x}_j(k)$, а эталонные сегменты $X_r(k)$ – простые выборки векторов $\mathbf{x}_j^{(r)}(k)$. Предположим, что все признаки являются дискретными с конечным множеством из $N > 1$ значений $\{\mathbf{x}_1, ..., \mathbf{x}_N\}$ [9]. Тогда сегменты $X(k)$ и $X_r(k_r)$ полностью описываются своими гистограммами $\{w_i(k)\}$ и $\{\theta_i^{(r)}(k_r)\}$, $i \in \{1, ..., N\}$, соответственно. Как показано в работах [9, 10], в таком случае критерий ближайшего соседа

$$\nu = \arg\min_{r \in \{1, ..., R\}} \rho_{PNNH}(X, X_r) \qquad (1)$$

будет асимптотически минимаксным для проверки гипотез W_r об однородности входного объекта и r-го эталона. Здесь мера близости $\rho_{PNNH}(X, X_r)$ определяется выходом вероятностной нейронной сети с посегментным анализом однородности (ВНС ПАО) [10].

Последовательная иерархическая система классификации

Рассмотрим иерархическую организацию процесса классификации (1), в которой на $j = 1$ уровне анализируются наиболее грубые приближения входного и эталонных объектов, например с малым числом однородных сегментов K. Запишем (1) в упрощенной форме [11]

$$W_\nu : \rho_{PNNH}(X, X_\nu) < \rho_0 \ . \qquad (2)$$

Для заданной вероятности p_{FRR} ложного пропуска объекта порог ρ_0 устанавливается равным p_{FRR}-квантилю множества расстояний между разноименными объектами. Если условие (2) не было выполнено ни для одного из эталонов, то для выделения входных объектов, не принадле-

жащих ни одному из эталонных классов, применяется сравнение минимального рассогласования с фиксированным порогом:

$$\rho_{PNNH}(X, X_\nu) > \rho_1 \ . \qquad (3)$$

Здесь порог ρ_1 для заданной вероятности p_{FAR} ложного срабатывания устанавливается равным $(1-p_{FAR})$-квантилю множества рассогласований между одноименными объектами из одного класса. Если условие (3) не выполняется, для проверки надежности решения (1) воспользуемся оптимальным в байесовском смысле правилом Чоу [12]

$$P\left(W_\nu \middle| X\right) > p_0, \qquad (4)$$

где значение порога p_0 можно выбрать, зафиксировав вероятность ошибки ложного срабатывания. В работе [9] показано, что для ВНС ПАО апостериорная вероятность $P\left(W_\nu \middle| X\right)$ гипотезы W_ν оценивается как

$$\hat{P}_j\left(W_\nu \middle| X\right) = \frac{\exp\left\{-nK \cdot \rho_{PNNH}\left(X, X_\nu\right)\right\}}{\sum_{r=1}^{R} \exp\left\{-nK \cdot \rho_{PNNH}\left(X, X_r\right)\right\}}, \qquad (5)$$

где n – средняя длительность одного сегмента.

Если для заданного уровня иерархии можно получить достаточно надежное решение (4), то процесс поиска на нем и останавливается. В противном случае описание входного объекта детализируется (что приводит к увеличению числа однородных сегментов K), и процесс принятия решений (1)–(4) повторяется заново до тех пор, пока не будет получено надежное решение (3) или время обработки не превысит некоторый порог t_0. Обычно количество шагов ограничивается исследователем, исходя из особенностей конкретной задачи (J = const). Если на J-м шаге надежное решение в смысле (4) не было найдено, среди потенциальных решений, полученных на всех J уровнях, выбирается решение с максимальной апостериорной вероятностью (5):

$$j^* = \arg\max_{j\in\{1,\ldots,J\}} \max_{r\in\{1,\ldots,R\}} \hat{P}_j\left(W_r \middle| X\right). \qquad (6)$$

Заметим, что каждый уровень предложенной иерархической трехпороговой системы можно рассматривать как добавление условия (4) к последовательному анализу [13] в принятии тернарных решений (three-way decisions) [14]. Каждый критерий (2), (3) и (4) определяет приближенное множество с переменной точностью, которое выражает степень неуверенности исследователя в принятом решении (1) и задается вероятностями ошибок первого и второго рода. При этом все критерии служат для решения своих задач: выражение (2) является основной для методов сокращения перебора, критерий (3) применяется для отбраковки объектов, не принадлежащих ни к одному классу, а выражение (4) позволяет выбрать решения, наиболее отличающиеся от остальных эталонов.

Результаты экспериментального исследования в задаче классификации изображений

В задаче распознавания образов изображение X с высотой U и шириной V требуется отнести к одному из C классов, заданных эталонами $\{X_r\}$ с высотой U_r и шириной V_r. Предположим, что все изображения содержат только анализируемые объекты, выделенные, например, с помощью соответствующих детекторов. Для решения задачи воспользуемся моделью кусочно-однородного объекта [10] – будем рассматривать J уровней детализации. На j-м уровне разобьем каждое изображение на $K_j^{(1)} \times K_j^{(2)}$ блоков (по $K_j^{(1)}$ строк и $K_j^{(2)}$ столбцов), при этом предполагаем, что $K_j^{(1)} < K_{j+1}^{(1)}, K_j^{(2)} < K_{j+1}^{(2)}$. В качестве признаков используем направление градиента яркости [4, 7], множество значений которого разбивается на N отрезков одинакового размера и для каждого блока $(k_j^{(1)}, k_j^{(2)})$ r-го эталонного и входного изображений вычисляют гистограммы направлений градиентов (HOG) [7], сопоставляемые с помощью ВНС ПАО [11].

В рамках экспериментального исследования рассмотрим задачу классификации людей по фотографиям лиц. В качестве их предварительной обработки для выделения лиц использовалась библиотека OpenCV с последующей медианной фильтрацией. В эксперименте исследовались точность и быстродействие принятия решений в полной иерархической трехпороговой системе в сравнении с традиционным методом PHOG [4], в котором происходит взвешенное агрегирование решений, полученных на всех уровнях иерархии. Веса в PHOG подбирались экспериментально так, чтобы обеспечить наивысшую точность. Использовалась объединенная база данных, состоящая из множеств AT&T, JAFFE и Yale, которая содержит 778 фотографий C = 65 различных людей. Для повышения быстродействия в пирамиде (иерархии) присутствуют всего два уровня: сетка 10×10 и сетка 20×20. В предложенной системе второй уровень иерархии (20×20) анализируется только в том случае, если для первого уровня (10×10) оценка апостериорной вероятности (5) не превышает порог $p_0 = 0{,}85$ (4). Зависимость точности и среднего времени принятия решений от размера обучающей выборки с выравниванием гистограмм [10, 11] приведена на рис. 1 и 2 соответственно. Точность классификации для иерархического подхода оказывается выше, чем точность каждого уровня пирамиды, что особенно заметно для малых обучающих выборок. Различия в вероятности ошибки PHOG и предложенного подхода (рис. 1) оказываются статистически незначимыми. Среднее время принятия решений (рис. 2) в предло-

женной иерархической системе в 1,5–3,5 раза меньше по сравнению с PHOG, так как в большинстве случае уже на первом уровне (10×10) удается получить достаточно надежное решение.

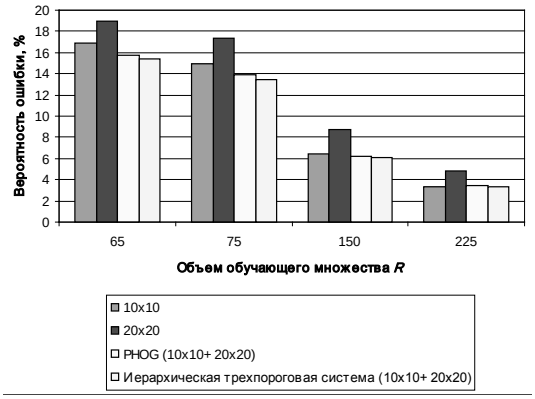


Рис. 1. Оценка вероятности ошибки для задачи распознавания лиц

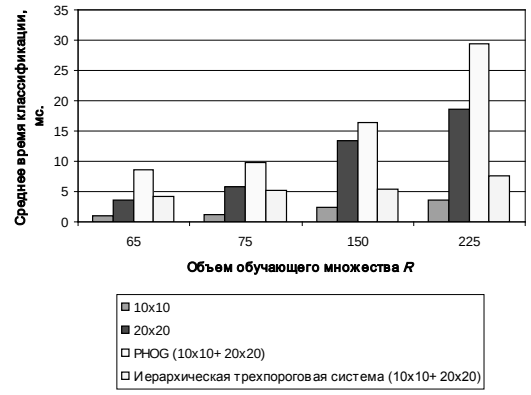


Рис. 2. Оценка среднего времени классификации изображения

Задача распознавания голосовых команд

Рассмотрим применение предложенного подхода (2)–(6) в задаче распознавания голосовых команд для русского языка [15], в которой речевой сигнал X требуется отнести к одному из R команд (слов/фраз) $\{X_r\}$. В качестве предварительной обработки с помощью известных методов VAD [16] производится детектирование речевого сигнала, выполняется его нормировка и с помощью простейшего амплитудного детектора входное слово X разбивается на S слогов $X^{(s)}, s \in \{1, ..., S\}$. При наличии требования к четкому слоговому произношению команд можно предположить, что все слоги выделены безошибочно. Далее, с помощью одного из известных алгоритмов фонемной сегментации [16] в s-м слоге выделяются сегменты $X^{(s)}(k), k \in \{1, ..., K^{(s)}\}$, где $K^{(s)}$ – общее число сегментов в слоге. Аналогичная процедура применяется и для эталона X_r, который разбивается на S_r слогов, состоящих из $K_r^{(s)}$ сегментов $X_r^{(s)}(k)$. Отметим известную особенность задачи распознавания речи: каждый сегмент можно отнести к одной из $L > 1$ фонем национального языка. Тогда сегмент $X^{(s)}(k)$ можно сопоставлять не со всеми сегментами всех эталонов, а только с L эталонными (гласными) звуками $\mathbf{x}_l^*, l \in \{1, ..., L\}$ из фонетической базы данных. Используя эту идею, реализованную в методе фонетического кодирования слов [15], r-му слову из словаря ставится в соответствие не эталонный сигнал, а последовательность кодов $\{l_{r,1}, l_{r,2}, ..., l_{r,S_r}\}$ гласных фонем.

Согласно иерархическому процессу принятия решений на $j = 1$ уровне рассматривается наиболее грубое приближение, в котором каждый s-й слог представляет собой один сегмент ($K^{(s)} = 1$). Далее оценивается апостериорная вероятность (5) принадлежности слога к l-й фонеме. Если максимальная апостериорная вероятность превышает порог p_0 (4), процесс поиска для s-го слога завершается. В противном случае слог вновь разбивается на $K^{(s)} + 1$ сегментов одинаковой длительности и процесс повторяется до тех пор, пока на некотором j^*-м уровне не будет выполнено условие (4) или длительность сегмента не станет меньше фиксированного порога (30–45 мс). В последнем случае среди всех J уровней выбирается тот, который соответствует максимальной апостериорной вероятности (6). Окончательное решение в задаче распознавания команды принимается по критерию

$$\nu = \underset{r \in \{1,...,R\}}{\arg\max} \left(\frac{\delta(S_r - S)}{S} \sum_{s=1}^{S} \hat{P}_{j^*} \left(\mathbf{x}^*_{l_{r,s}} \middle| X^{(s)} \right) \right). \quad (7)$$

В рамках экспериментального исследования рассмотрим задачу распознавания изолированных фраз для русского языка из словаря с названиями 1913 лекарств. Исследовались три режима: 1) иерархическое распознавание (2)–(7) с порогом $p_0 = 0{,}8$; 2) традиционный подход – $J = 1$ уровень с сегментами (фреймами) фиксированной длительности 45 мс и 3) применение известной реализации скрытых марковских моделей в системе CMU Pocketsphinx вместо выражения (1) для распознавания гласной фонемы. В процессе настройки каждый из пяти дикторов четко проговаривал каждый из $L = 6$ гласных звуков. Время обучения составило 1–5 минут. В ходе тестирования системы все дикторы произносили с четкой паузой между слогами по 10 реализаций каждого слова из словарей эталонов. На рис. 3, 4 представлены результаты эксперимента при добавлении к тестовым сигналам гауссовского шума для некоторых значений отношения сигнал/шум.

Здесь, во-первых, применение иерархической системы в рамках выражений (2)–(6) привело не только к снижению среднего времени принятия решений в 1,6–2,8 раза по сравнению с одноуровневым распознаванием с фиксированным размером фрейма и в 9–15 раз по сравнению с реализацией скрытых марковских моделей в Pocketsphinx, но и к повышению точности на 4–8 %. Для сравнения,

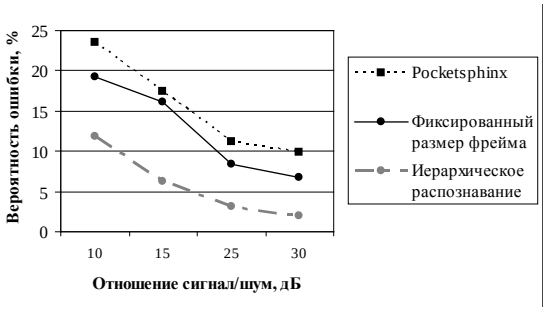


Рис. 3. Оценка вероятности ошибки для задачи распознавания голосовых команд

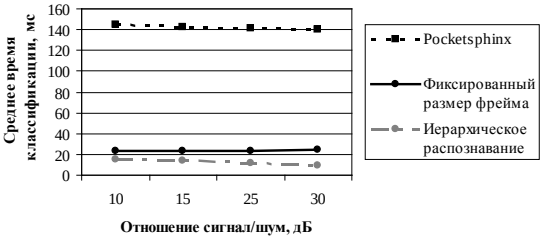


Рис. 4. Оценка среднего времени классификации одной команды

точность распознавания слитной речи с помощью Pocketsphinx из того же словаря и для той же группы дикторов оказалась на 10–15 % ниже. Во-вторых, время t_{avg} классификации для предложенного иерархического подхода ожидаемо растет при увеличении уровня шума, что связано со снижением числа надежных решений (1). Наконец, разработанный подход оказывается более устойчивым к аддитивному шуму (рис. 3), чем традиционный подход, реализованный в системе Pocketsphinx.

Выводы

Таким образом, в настоящей статье представлен иерархический способ классификации аудиовизуальной информации с последовательной детализацией для повышения точности и вычислительной эффективности методов с посегментным анализом однородности [8]. На каждом уровне иерархии применяются решающие правила для отбраковки сомнительных с точки зрения надежности решений, досрочного останова перебора и выбора наиболее надежного решения по правилу Чоу [12]. Показано, что такой подход позволяет в 1,5–3,5 раза ускорить процедуру классификации по сравнению с традиционными иерархическими методами.

Статья подготовлена в ходе проведения исследования (№ 15-01-0019) в рамках программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2015–2016 гг. и с использованием средств субсидии на государственную поддержку ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, выделенной НИУ ВШЭ.

Литература

1. *Hawkins J., Blakeslee S.* On Intelligence. New York : St. Martin's Griffin, 2005. 272 p.

2. *Савченко А.В., Милов В.Р.* О построении иерархической системы интеллектуального анализа и распознавания аудио/видеообъектов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. № 11. С. 23–30.

3. *Deng L., Yu D.* Deep Learning: Methods and Applications // Foundations and Trends® in Signal Processing. 2014. V. 7, № 3/4. P. 197–387.

4. *Bosch A., Zisserman A., Munoz X.* Representing Shape with a Spatial Pyramid Kernel // Proc. of the 6th ACM International Conference on Image and Video Retrieval CIVR'07. 2007. P. 401–408.

5. *Утробин В.А.* Введение в теорию активного восприятия // Датчики и системы. 2013. № 7 (170). С. 34–39.

6. *Theodoridis S., Koutroumbas K.* Pattern Recognition, Fourth Edition. Burlington, MA ; London : Academic Press, 2008. 984 p.

7. *Dalal N., Triggs B.* Histograms of Oriented Gradients for Human Detection // Proc. Computer Vision & Pattern Recognition. 2005. P. 886–893

8. *Савченко А.В.* Образ как совокупность выборок независимых одинаково распределенных значений признаков в задачах распознавания сложноструктурированных объектов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80, № 3. С. 70–80.

9. *Савченко В.В., Савченко А.В.* Принцип минимального информационного рассогласования в задаче распознавания дискретных объектов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2005. Вып. 3. С. 10–18.

10. *Savchenko A.V.* Probabilistic neural network with homogeneity testing in recognition of discrete patterns set // Neural Networks. 2013. V. 46. P. 227–241.

11. *Savchenko A.V.* Directed enumeration method in image recognition // Pattern Recognition. 2012. V. 45, № 8. P. 2952–2961.

12. *Chow C.K.* On optimum recognition error and reject trade-off // IEEE Transactions on Information Theory. 1970. V. 16. P. 41–46.

13. *Wald A.* Sequential Analysis. New York : Dover Publications, 2013.

14. *Yao Y.Y.* Granular Computing and Sequential Three-Way Decisions // Proc. Int. Conf. Rough Sets and Knowledge Technology, LNCS/LNAI. 2013. V. 8171. P. 16–27.

15. *Савченко А.В.* Метод фонетического кодирования в задаче распознавания изолированных слов // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 4. С. 339–345.

16. *Benesty J., Sondh M., Huang Y.* Springer Handbook of Speech Recognition. N. Y. : Springer, 2008. 1176 p.

О применении нечетких решений для повышения точности распознавания изолированных слов русского языка

Л.В. Савченко

Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова

Задача автоматического распознавания речи (АРР) является одним из наиболее актуальных направлений в области искусственного интеллекта [1]. В работе [2] для распознавания изолированных слов русского языка был предложен метод нечеткого фонетического кодирования-декодирования слов (НФКДС), основанный на теории нечетких множеств [3] и известном методе фонетического кодирования-декодирования слов (ФКДС) [4]. К сожалению, метод НФКДС в настоящее время все еще недостаточно апробирован в реальных условиях. Указанный пробел в какой-то степени устраняет настоящая работа, посвященная натурным экспериментальным исследованиям метода НФКДС. В ней показано преимущество нечетких решений [5] и проведен ряд экспериментов, подтверждающий эффективность применения теории нечетких множеств при распознавании фонем в рамках предложенного подхода.

Метод нечеткого фонетического кодирования-декодирования слов

Рассмотрим задачу распознавания изолированных слов. Пусть задано множество из $L > 1$ эталонных слов $\{X_l\}$, где $l = \overline{1, L}$ – номер слова-эталона. Согласно популярному фонетическому подходу [6], каждое эталонное слово разбивается на последовательность фонем (транскрипцию) $X_l = \left\langle r_{l,1}, r_{l,2}, ..., r_{l,L_l} \right\rangle$ [4]. Здесь L_l – длительность команды (в фонемах), а числа $r_{l,i} \in \{1, ..., R\}, i = \overline{1, L_l}$ – номера фонем из фонетического алфавита $\left\{\mathbf{x}_r^*\right\}$, $r = \overline{1, R}$, где R – количество фонем в алфавите. Задача состоит в том, чтобы поступившему на вход речевому сигналу (слову) X поставить в соответствие наиболее близкое к нему слово-эталон.

Сведем задачу распознавания изолированных слов к распознаванию гласных фонем в слоге, т.е. фонетическая база данных состоит только из гласных фонем, так как они наиболее хорошо распознаются [7]. Вновь поступающему на вход слогу $\mathbf{x}$ требуется поставить в соответствие одну из R эталонных фонем $\mathbf{x}_r^*$. Вначале каждый слог разбивается на непересекающиеся сегменты [8] $\{\mathbf{x}(t)\}$, $t = \overline{1, T}$ длиной $\tau \approx (0{,}01 - 0{,}015)$ с. Далее каждый полученный сегмент отождествляется с той из фонем-эталонов, которая отвечает принципу минимума информационного рассогласования Кульбака – Лейблера [9] $\rho\left(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*\right)$ между сигналом $\mathbf{x}(t)$ и эталоном $\mathbf{x}_r^*$. На практике для вычисления $\rho\left(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*\right)$ в режиме реального времени часто применяется метод обеляющего фильтра [10].

Итоговое решение принимается в пользу наиболее часто встречающегося кода по всем моментам времени. Описанный подход представляет алгоритм ФКДС в задаче АРР. Чтобы избежать пропуска истинной фонемы, обычно близкие между собой звуки (например, /ы/ и /и/) объединяют в один кластер. Это приводит к значительному сокращению количества различимых фонем и, как следствие, к увеличению числа альтернативных решений на выходе алгоритма АРР, особенно для коротких по длительности слов.

Метод НФКДС [2] позволяет устранить недостаток метода ФКДС определением фонемы как нечеткого множества минимальных речевых единиц (МРЕ), т.е. в методе НФКДС каждому слогу ставится в соответствие не один эталон $\mathbf{x}_r^*$ (как в ФКДС), а нечеткое множество $\left\{\left(\mathbf{x}_r^*, \mu_i\left(\mathbf{x}_r^*\right)\right)\right\}$, где $\mu_i\left(\mathbf{x}_r^*\right)$ – степень принадлежности эталона $\mathbf{x}_r^*$ к i-й фонеме, а r – количество эталонных фонем. Мы предлагаем оценить $\mu_i\left(\mathbf{x}_r^*\right)$ как условную вероятность $P\left(\mathbf{x}_r^* / \mathbf{x}_i^*\right)$ [2]. Воспользуемся тем, что рассогласование Кульбака – Лейблера между объектами классов i и r в асимптотике с точностью до постоянного множителя λ = const > 0 имеет нецентральное хи-квадрат-распределение с числом степеней свободы $K = M - p$ (M – количество отсчетов во фрейме входного сигнала) для авторегрессионной модели гауссовского сигнала и параметром нецентральности $\lambda \cdot \rho\left(\mathbf{x}_r^*, \mathbf{x}_i^*\right)$. Тогда, если M достаточно велико, воспользуемся центральной предельной теоремой. Используя известное распределение минимума независимых нормальных величин, получим

$$P\left(\mathbf{x}_r^* / \mathbf{x}_i^*\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times \\ \times \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{R} \left(\frac{1}{2} - \Phi\left(\tilde{t}_{r,i,k}(t)\right)\right) dt,$$

где $\Phi\left(\tilde{t}\right)$ – функция распределения нормальной случайной величины $N(0, 1)$, а

$$\tilde{t}_{r,i,k}(t) = \frac{t \cdot \sqrt{4\lambda \cdot \rho(\mathbf{x}_r^*, \mathbf{x}_i^*) + 2(K-1)}}{\sqrt{4\lambda \cdot \rho(\mathbf{x}_k^*, \mathbf{x}_i^*) + 2(K-1)}} + \frac{\lambda \cdot \left(\rho(\mathbf{x}_r^*, \mathbf{x}_i^*) - \rho(\mathbf{x}_k^*, \mathbf{x}_i^*)\right)}{\sqrt{4\lambda \cdot \rho(\mathbf{x}_k^*, \mathbf{x}_i^*) + 2(K-1)}}.$$

Здесь λ – параметр масштабирования, который подбирается экспериментально для каждой меры близости. Входному сигналу $\mathbf{x}(t)$ также ставится в соответствие нечеткое множество вида $\left\{\left(\mathbf{x}_r^*, \mu\left(\mathbf{x}(t)/\mathbf{x}_r^*\right)\right)\right\}$. Здесь степень принадлежности $\mu\left(\mathbf{x}(t)/\mathbf{x}_r^*\right)$ определяется как апостериорная вероятность $P\left(\mathbf{x}_r^*/\mathbf{x}(t)\right)$ принадлежности фрейма $\mathbf{x}(t)$ к r-й гласной. Оценим ее в предположении о равенстве априорных вероятностей всех R звуков на основе известной связи рассогласования Кульбака – Лейблера с методом максимального правдоподобия [9]:

$$P\left(\mathbf{x}_r^*/\mathbf{x}(t)\right) = \frac{\exp\left(-\lambda \cdot \rho\left(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}_r^*\right)\right)}{\sum_{i=1}^{R} \exp\left(-\lambda \cdot \rho\left(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}_i^*\right)\right)}.$$ Далее

для каждого сегмента $\mathbf{x}(t)$, используя операцию нечеткого пересечения множеств $\left\{\left(\mathbf{x}_r^*, \mu_j\left(\mathbf{x}_r^*\right)\right)\right\}$ и $\left\{\left(\mathbf{x}_r^*, \mu(\mathbf{x}(t)/\mathbf{x}_r^*)\right)\right\}$, получаем результирующее множество $\left\{\mathbf{x}_r^*, \mu(r,t)\right\}$:

$$\mu(r,t) = \min\left(\mu_{\nu(t)}\left(\mathbf{x}_r^*\right), \mu\left(\mathbf{x}(t)/\mathbf{x}_r^*\right)\right), \qquad (1)$$

где $\nu(t) = \arg\min_{r=\overline{1,R}} \rho\left(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}_r^*\right)$, $t = \overline{1,T}$ – номер ближайшей эталонной фонемы. Если существует более одной реализации МРЕ для каждой фонемы, то вначале производится редукция данных к множеству информационных центров. Тогда, используя операцию нечеткого объединения, определим степень принадлежности как

$$\mu_i\left(\mathbf{x}_r^*\right) = \max_{j \in \{1,\ldots,J_i\}} P\left(\mathbf{x}_r^*/\mathbf{x}_{i,j}\right). \qquad (2)$$

Известно, что, если $\mathbf{x}(t)$ принадлежит тому же классу, что и эталон $\mathbf{x}_\gamma^*$, то $\forall r \in \{1,\ldots,R\}$ в асимптотике для рассогласования Кульбака – Лейблера $\rho\left(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}_r^*\right) \to \rho\left(\mathbf{x}_\gamma^*, \mathbf{x}_r^*\right)$. Поэтому, согласно (1), если $\gamma = \nu(t)$, то $\mu(\nu(t), t) \approx 1$. Если же $\gamma \neq \nu(t)$, то $\mu(\nu(t), t) = \mu(\mathbf{x}(t)/\mathbf{x}_{\nu(t)}^*) << 1$. Таким образом, выражение (1) приводит к существенному понижению степеней принадлежности в случае ошибки распознавания ($\gamma \neq \nu(t)$), а операция нечеткого объединения (2) позволяет не занизить $\mu(r,t)$, если хотя бы одна из эталонных МРЕ из множества $\left\{\mathbf{x}_{\gamma,j}\right\}$, $j = \overline{1,J_\gamma}$ близка к эталону $\mathbf{x}_{\nu(t)}^*$.

Далее на основе всех $\mu(r,t)$ требуется принять решение в пользу принадлежности слога к одной из R эталонных фонем. В данной работе решение принимается простым голосованием $\mu(r) = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} \mu(r,t)$. В результате на выходе алгоритма распознавания слогов получаем нечеткое множество $\left\{\left(\mathbf{x}_r^*, \mu(r)\right)\right\}$. Степень принадлежности μ_l распознаваемого слова X определяется как среднее арифметическое степеней принадлежности слогов $\mu(r)$, составляющих слово. На выходе алгоритма распознавания слов методом НФКДС мы получаем нечеткое множество $\left\{\left(X_l, \mu_l\right)\right\}$. Итоговое решение в задаче распознавания слов принимается в пользу слова X^* по критерию максима μ_l.

Далее рассмотрим применение операции нечеткого объединения при распознавании фонемы /ы/ методом НФКДС в один из моментов времени. Для нашего примера фонетическая база данных состоит из тридцати эталонных фонем по три реализации на каждую $\mathbf{x}_r^*$. Для каждой реализации $\mathbf{x}_r^*$ находилась вероятность $P\left(\mathbf{x}_r^*/\mathbf{x}_i^*\right)$, которая использовалась для вычисления степени принадлежности (2).

В табл. 1 приведен пример применения операции нечеткого объединения для звука /ю/ в случае ошибки распознавания звука /ы/, т.е. степень принадлежности /ю/ оказалась больше степеней принадлежности других звуков.

Таблица 1

Пример применения операции нечеткого объединения (2) для звука /ю/

	/у/	/ю/	/е/	/ы/
$P\left(\mathbf{x}_r^*/\mathbf{x}_{i,1}\right)$ для 1-й реализации /ю/	0,107	0,101	0,085	0,002
$P\left(\mathbf{x}_r^*/\mathbf{x}_{i,2}^*\right)$ для 2-й реализации /ю/	0,103	0,110	0,089	0,107
$P\left(\mathbf{x}_r^*/\mathbf{x}_{i,3}^*\right)$ для 3-й реализации /ю/	0,10	0,104	0,076	0,067
Нечеткое объединение $\mu_i\left(\mathbf{x}_r^*\right)$	0,107	0,110	0,089	0,107

Примечание:
i – номер звука /ю/, r – номер звука /ы/.

Как видно из этой таблицы, благодаря операции нечеткого объединения (последняя строка) все реализации эталонной фонемы /ю/ вносят свой вклад в $\mu_i\left(\mathbf{x}_r^*\right)$, а не только ИЦ-эталоны. Например, в первой и третьей реализации вклад /ы/ является несущественным, т.е. фонемы /ю/ и /ы/ не близки в смысле выбранного рассогласования, в то время как во второй реализации степень принадлежности фонемы /ю/ к /ы/ является высокой (0,107), т.е. звуки /ю/ и /ы/ оказались близки. Поэтому в результате применения операции нечеткого объединения степень принадлежности /ю/ к /ы/ повысится по сравнению с первой и третьей реализациями и составит 0,107 (четвертая строка таблицы).

Результаты экспериментальных исследований в задаче распознавания слов

Проведем сравнение метода НФКДС с наиболее известными аналогами АРР по такому показателю качества, как вероятность ошибки распознавания (количество неверно распознанных слов в процентах). В качестве аналогов были взяты следующие известные системы АРР для русского языка:

а) метод ФКДС с послоговым произношением, на котором основан метод НФКДС. Преимуществом метода ФКДС является быстрая настройка на голос нового диктора (диктору необходимо произнести все гласные звуки, которые автоматически сохраняются в фонетическую базу данных) и автоматическая адаптация словаря среднего размера;

б) русскоязычная клиент-серверная версия системы Google Voice Search, которая представляет собой поисковую систему, принимающую запросы в виде голосовых сообщений. Результаты отображаются в инфографической форме. Голосовой помощник распознает естественную речь. Считается, что качество дикторонезависимого распознавания этой системы из большого универсального словаря в настоящее время очень высоко. Система не имеет возможности произвести настройку под конкретного пользователя, т.е. не имеет дикторозависимого режима распознавания;

в) система пофонемного распознавания Perpetuum M, в которой не требуется настройка на диктора, а словарь вводится в текстовом виде;

г) современная система распознавания CMU PocketSphinx, разработанная в Карнеги-Меллон университете. Настройка на диктора осуществлялась с помощью программы SphinxTrain на базе акустической модели русского языка из проекта ru4sphinx. Система CMU Sphinx поддерживает возможность автоматической адаптации словаря, поэтому она может быть использована в методе ФКДС для распознавания гласных в слогах.

Для сравнения систем АРР были взяты два словаря:

1) названия лекарств (1913 наименований);

2) названия городов (1830 наименований).

Тестирование систем распознавания проводилось группой дикторов разного возраста, тремя мужчинами и тремя женщинами (всего 6 дикторов). Для этого каждый диктор произносил 500 слов из каждого словаря по две реализации на каждое слово. Тестирование методов ФКДС и НФКДС проводилось в дикторозависимом и дикторонезависимом режимах с использованием меры близости Кульбака – Лейблера совместно с оценками спектральной плотности мощности, порядок АР-модели $p = 20$, частота дискретизации $F = 8$ кГц, соотношение сигнал/шум равно 25 дБ для всех сигналов, в качестве эталонов использовались 30 изолированно произнесенных гласных звуков русского языка по три реализации на каждый звук.

Оценки вероятности ошибки АРР приведены в табл. 2, 3 для различных словарей в формате среднее (по дикторам) ± среднеквадратичное отклонение.

Таблица 2

Оценки вероятности ошибки АРР для словаря «Лекарства» (в %)

Система АРР	Словарь «Лекарства»
Google Voice Search (слитная речь)	34 ± 7,5
CMU PocketSphinx (дикторонезависимый режим, слитная речь)	23 ± 5,2
CMU PocketSphinx (дикторозависимый режим, послоговое произношение)	18 ± 3,8
Perpetuum M v. 3.01 (слитная речь)	49,6 ± 15,5
ФКДС (дикторонезависимый режим)	18,2 ± 1,8
ФКДС (дикторозависимый режим)	15,1 ± 2,7
НФКДС (дикторонезависимый режим)	14,8 ± 3,5
НФКДС (дикторозависимый режим)	12,7 ± 5,2

Таблица 3

Оценки вероятности ошибки АРР для словаря «Города» (в %)

Система АРР	Словарь «Города»
Google Voice Search (слитная речь)	20,6 ± 7,0
CMU PocketSphinx (дикторонезависимый режим, слитная речь)	18,6 ± 6,5
CMU PocketSphinx (дикторозависимый режим, послоговое произношение)	16,4 ± 4,3
Perpetuum M v. 3.01 (слитная речь)	44,1 ± 14,7
ФКДС (дикторонезависимый режим, послоговое произношение)	16,8 ± 6,0
ФКДС (дикторозависимый режим, послоговое произношение)	14,9 ± 4,3
НФКДС (дикторонезависимый режим)	14,1 ± 4,0
НФКДС (дикторозависимый режим)	10,4 ± 3,6

Как видно из табл. 2, 3, метод НФКДС превосходит по точности распознавания наиболее известные системы распознавания речи благодаря послоговому произношению, возможности на-

стройки фонетической базы данных под конкретного пользователя (дикторозависимый режим распознавания) и использованию операций нечеткого пересечения (1) и нечеткого объединения (2). Ошибка распознавания для словаря лекарств для системы Google Voice Search является неудовлетворительной (порядка 34 %) из-за того, что названия некоторых лекарств являются специфическими и отсутствуют в эталонном словаре системы.

Выводы

В данной работе проведено сравнение вероятности ошибки распознавания слов методом НФКДС, использующим операции с нечеткими множествами, с наиболее известными системами распознавания русской речи. Показано, что точность распознавания метода НФКДС превосходит точность распознавания существующих систем на 4,5–30 %. Повышение точности распознавания достигается, во-первых, определением фонемы как нечеткого множества МРЕ, во-вторых, применением операции нечеткого пересечения, которая значительно уменьшает степени принадлежности фонем в случае ошибки распознавания, в-третьих, ограничением на стиль произношения (послоговое произношение) и дикторозависимым режимом распознавания. Таким образом, в настоящей работе проведен ряд экспериментальных исследований, подтверждающий возможность применения нечетких решений в задаче распознавания изолированных слов для повышения точности распознавания.

Литература

1. *Люггер Д.Ф.* Искусственный интеллект. М. : Вильямс, 2003. 864 с.

2. *Савченко Л.В.* Автоматическое распознавание изолированных слов на основе теории нечетких множеств и кластерной модели минимальных речевых единиц // Информационные технологии. 2014. № 2. С. 9–13.

3. *Zadeh L.A.* Fuzzy Sets // Information Control. 1965. V. 8. P. 338–353.

4. *Савченко В.В.* Метод фонетического декодирования слов в задаче автоматического распознавания речи на основе принципа минимума информационного рассогласования // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2009. Вып. 5. С. 31–41.

5. *Ding I.J.* Speech recognition using variable-length frame overlaps by intelligent fuzzy control // J. Intelligent and Fuzzy Systems. 2013. V. 25, № 1. P. 49–56.

6. *Ронжин А.Л., Ли И.В.* Автоматическое распознавание русской речи // Вестник Российской академии наук. 2007. Т. 77, № 2. С. 133–138.

7. *Anusuya M.A., Katti S.K.* Speech recognition by Machine: A Review // Int. J. Computer Science and Information Security. 2009. V. 6, № 3. P. 721–743.

8. *Сорокин В.Н., Цыплихин А.И.* Сегментация и распознавание гласных. // Информационные процессы. 2004. Т. 4, № 2. С. 202–220.

9. *Kullback S.* Information Theory and statistics. Dover Pub., 1997. 399 p.

10. *Савченко В.В., Акатьев Д.Ю.* Теоретико-информационное обоснование метода обеляющего фильтра в задачах автоматического распознавания речи // Системы управления и информационные технологии. 2008. Т. 31, №1. С. 21–30.

Психофизиологические маркеры синдрома дефицита внимания с гиперактивностью у школьников младшего школьного возраста

Л.В. Савчук[1], С.А. Полевая[1], А.И. Федотчев[2], М.М. Циркова[3]

[1]ЦНИЛ Нижегородской государственной медицинской академии
[2] Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Московская область
[3] Центр реабилитации и восстановительного лечения клинической больницы № 2 ПОМЦ ФМБА России, Нижний Новгород

Синдром дефицита внимания с гиперактивностью (СДВГ) является самой частой причиной нарушений поведения, трудностей обучения, школьной дезадаптации. Современная экспертная оценка распространенности СДВГ, основанная на анализе международных баз данных, составляет 7,2 % [18], но из-за недостаточной или избыточной диагностики эта величина может варьировать у разных авторов в пределах 4–16 % [13]. В настоящее время СДВГ рассматривается в рамках полиэтиологической теории [2], а его диагностика основывается на клинических критериях. Для подтверждения СДВГ пока не существует специальных тестов или маркеров, основанных на применении современных психологических, нейрофизиологических, биохимических, молекулярно-генетических и других методов [3, 4, 6]. У детей с СДВГ отмечают отклонения в развитии когнитивных и аффективных функций, отвечающих за разные этапы познания и целенаправленного поведения [1, 17]. Изучение особенностей когнитивных процессов и эмоционального состояния у детей с СДВГ является актуальной задачей, решение которой позволит подбирать наиболее эффективные методы диагностики и лечения данного синдрома [5, 10–12]. В данной статье приводятся результаты пилотного исследования психофизических коррелятов СДВГ в сравнении со здоровыми детьми младшего школьного возраста. Выбраны способы измерения, отвечающие следующим требованиям:

– возможность сравнения с единым объективным эталоном без привлечения специальных шкал;

– возможность анализа результатов измерения методами статистики без привлечения теоретических оригинальных концепций и моделей для интерпретации;

– отображение измеряемыми параметрами режимов работы мозга и пороговых характеристик обработки простых сенсорных сигналов.

Методы

В качестве «золотого стандарта» из классических психологических методов диагностики СДВГ применена тестовая методика Тулуз-Пьерона, которая является одним из вариантов «корректурной пробы» и позволяет измерить скорость и точность выделения целевых паттернов. Точность выделения целевых паттернов рассматривается как надежный показатель селективного внимания, а скорость связывают с уровнем активности. По этим данным оценивается степень выраженности минимальной мозговой дисфункции (ММД) [16]. Тестирование занимает 15 минут.

Для измерения дифференциальных порогов восприятия цвета применен метод компьютерной кампиметрии [8, 9, 14, 15], позволяющий получить распределения порогов цветоразличения по шкале оттенков в рамках компьютерной цветовой модели HSL. Результатом измерений является функция цветоразличения (ФЦР). Время тестирования 5–7 минут.

Для оценки звуколокализационной функции, характеризующей межполушарную асимметрию, применен метод компьютерной латерометрии. С помощью серии дихотических звуковых импульсов с периодом 300 мс и шагом 23 мкс формировалась иллюзия движения субъективного звукового образа по межушной дуге и измерялись пороговые межушные задержки. Поскольку иллюзия движения звука вправо обусловлена увеличением доминирования левого полушария, а иллюзия движения влево – правого, мы получили количественную оценку возбудимости, лабильности и устойчивости каждого полушария и их межполушарных отношений. Результатом измерений явилась звуколокализационная функция (ЗЛФ). Тестирование занимает от 5 до 20 минут.

Статистическая обработка: параметрические критерии (*t*-критерий Стьюдента), кластерный анализ (кластеризация методом *k* средних, *EM*-кластеризация), ANOVA (метод повторных измерений), корреляционный анализ, факторный анализ (метод главных компонент).

Результаты

В исследовании приняли участие 22 ребенка в возрасте от 7 до 12 лет. Экспериментальная группа – 11 детей с диагнозом СДВГ (по DSM-IV). Контрольная группа – 11 детей без диагноза.

В экспериментальной группе выявлены разные формы СДВГ (в соответствии с классификацией DSM-IV-TR): СДВГ с преобладанием гиперактивности и импульсивности – 4 ребенка; сочетанная (комбинированная) форма СДВГ – 7 детей. У всех детей с сочетанной формой СДВГ выявлены признаки минимальной мозговой дисфункции по тесту Тулуз-Пьерона. Значения основных показателей по тесту Тулуз-Пьерона – скорости и точности, достоверно ниже у детей с сочетанной формой СДВГ, чем у детей других групп.

При СДВГ проявляются достоверные изменения в характеристиках цветового зрения: во всех оттенках пороги цветоразличения достоверно выше, чем у здоровых детей. У здоровых детей преобладает ФЦР с максимальным дифференциальным порогом в оттенках зеленого диапазона, а у пациентов преобладает ФЦР с максимальным дифференциальным порогом в оттенках синего диапазона.

При нарушении внимания с гиперактивностью выявлены достоверные изменения в функциональном состоянии мозга, проявляющиеся в значениях порогов латеролизации дихотического стимула: у пациентов в сравнении со здоровыми детьми выявлено повышение пороговых значений межушных задержек, характеризующих лабильность и возбудимость правого и левого полушарий. По критерию лабильности среди пациентов достоверно больше детей с доминированием правого полушария, а среди здоровых достоверно больше детей с доминированием левого полушария как по лабильности, так и по возбудимости. Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными другими авторами [7].

Установлено сходство в структуре корреляций в группах «здоровые» и СДВГ: увеличение дифференциального порога для оттенков в диапазоне синего сильно связано с уменьшением лабильности и возбудимости обоих полушарий; скорость обнаружения паттернов в тесте Тулуз-Пьерона положительно коррелирует с показателями лабильности в латерометрии. Установлено, что у пациентов меньше значимых корреляций между измеряемыми параметрами, чем у здоровых. Можно предположить, что у детей с СДВГ редуцировано взаимодействие между функциональными модулями мозга.

Выявлены отрицательная корреляция между показателем точности по тесту Тулуз-Пьерона и дифференциальным порогом в одном из оттенков синего (H = 190, S = 220, L = 100) (–0,87) и между показателем скорости по тесту Тулуз-Пьерона и дифференциальным порогом в одном из оттенков сине-зеленого диапазона (H = 160, S = 220, L = 100) (–0,93).

Благодаря регрессионному анализу определены функции, позволяющие по данным кампиметрии рассчитать показатели селективного внимания и скорости:

$K = -0{,}0118 \cdot \mathrm{dH190} + 0{,}9083 \quad (R^2 = 0{,}79)$,

$V = -3{,}656 \cdot \mathrm{dH160} + 57{,}562 \quad (R^2 = 0{,}6)$.

K – точность по тесту Тулуз-Пьерона, dH190 – дифференциальный порог по оттенку 190; V – скорость по тесту Тулуз-Пьерона, dH160 – дифференциальный порог по оттенку 160.

Методом кластерного анализа k средних выборка разделилась на два кластера: СДВГ, «здоровые». Определены диапазоны параметров функции цветоразличения и звуколокализационной функции, специфичные для детей с нарушениями по типу СДВГ. Высокая надежность и чувствительность кластеризации заслуживает внимания и доказывает перспективность регистрации показателей кампиметрии и латерометрии для скрининговых обследований.

Ухудшение цветоразличения в оттенках синего и доминирование правого полушария по показателям латерометрии можно рассматривать как возможные маркеры повышенного риска развития клинической формы СДВГ у детей младшего школьного возраста. Объективные признаки состояния физиологической системы, связанные с дефицитом внимания и гиперактивностью, могут быть применены не только для доклинической диагностики но и для мониторинга динамики состояния при СДВГ.

Работа выполнена при поддержке грантов: РФФИ № 14-06-00390-а, РГНФ № 15-06-10894-а.

Литература

1. *Астапов В.М., Викторова В.В., Дробышева Т.В.* Тревога как сопутствующий фактор синдрома дефицита внимания и гиперактивности у детей // Психологический журнал. 2007. Т. 28, № 6. С. 91–100.

2. *Гончарова О.В., Ветров П.А., Горшков О.В.* Распространенность, диагностика и методы коррекции синдрома дефицита внимания с гиперактивностью у детей // Медицинский совет. 2012. № 12. С. 96–103.

3. *Грибанов А.В., Депутат И.С.* Распределение уровня постоянных потенциалов головного мозга у детей с синдромом дефицита внимания и гиперактивностью при различном уровне интеллекта // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. 2008. № 1. С. 4–9.

4. *Заваденко Н.Н.* Синдром дефицита внимания с гиперактивностью: диагностика, патогенез, принципы лечения // Вопросы практической педиатрии. 2012. Т. 7, № 1. С. 54–62.

5. *Земляная А.А., Федотчева Т.А., Федотчев А.И.* Современные подходы к активизации познавательной деятельности человека // Успехи физиол. наук. 2010. Т. 41, № 4. С. 45–62.

6. *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.

7. Способ исследования функционального состояния мозга : патент РФ № 2130753 / Маясова Т.В., Паренко М.К., Щербаков В.И., Алымов В.А. 1999.

8. *Полевая С.А.* Интегративные принципы кодирования и распознавания сенсорной информации. Особенности осознания световых и звуковых сигналов в стрессовой ситуации // Вестник Новосибирского государственного университета. 2008. Т. 2, вып. 2. С. 106–117.

9. *Полевая С.А., Еремин Е.В., Зевеке А.В.* Компьютерные технологии для исследования структуры субъективного сенсорного пространства человека // Нижегородский медицинский журнал. 2003. Т. 1. С. 17–24.

10. *Федотчев А.И.* Стресс, его последствия для человека и современные нелекарственные подходы к их устранению // Успехи физиол. наук. 2009. Т. 40, № 1. С. 102–115.

11. *Федотчев А.И.* Об эффективности процедур биоуправления с обратной связью от ЭЭГ пациента при коррекции функциональных нарушений, вызванных стрессом // Физиология человека. 2010. Т. 36, № 1. С. 100–105.

12. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Семёнов В.С.* Нелекарственная коррекция функциональных расстройств у человека. Принцип двойной обратной связи от ЭЭГ-осцилляторов пациента. Saarbrucken : LAP Lamberts Academic Publishing, 2010. 79 с.

13. *Чутко Л.С.* Школьная дезадаптация в клинической практике детского невролога. СПб. : ИПИК БИОНТ, 2005. 53 с.

14. Способ исследования межполушарной сенсорной асимметрии : патент № 2198589 / Щербаков В.И., Полевая С.А., Паренко М.К. 1999.

15. Способ исследования цветового зрения человека : патент № 2222250 / Щербаков В.И., Паренко М.К., Полевая С.А. 2002.

16. *Ясюкова Л.А.* Оптимизация обучения и развития детей с ММД : тест Тулуз-Пьерона : методическое руководство. СПб. : ИМАТОН, 2007. 104 с.

17. *Maslova O.I., Goryunova A.V., Gureva M.B., Balkanskaya S.V., Dneprova L.I., Golovkina I.D.* Use of computer-assisted testing systems for diagnosis of cognitive disorders in schoolchildren with attention deficit hyperactivity disorder // Biomedical engineering. 2005. V. 39, №1. P. 6–11. DOI: 10.1007/s10527-005-0031-1.

18. *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.

Латентные изменения состояния системы памяти о навыке

О.Е. Сварник

Институт психологии РАН, Москва

Известно, что после формирования нового поведенческого навыка память об этом навыке претерпевает изменения. Причем эти изменения могут происходить в латентный период, т.е. в течение периода, когда сформированный навык не используется. В настоящее время накоплено большое количество фактов, касающихся улучшения параметров выполнения тех или иных навыков через 24 часа и более после формирования этих навыков без их реального выполнения в этот промежуток времени, т.е. в латентный период или период неактивности этого навыка. Такой период, как правило, включает состояние сна организма. На поведенческом уровне такое явление было продемонстрировано для разных форм памяти: декларативной [1], перцептивной [2], моторной [3]. В некоторых исследованиях, наоборот, не обнаруживается достоверного изменения параметров выполнения заданий во время отсроченного теста по сравнению с тестом, следующим непосредственно после обучения [4]. Однако было установлено, что позитивным (с точки зрения успешности поведения) реорганизациям подвергается тот опыт, вероятность использования которого в будущем выше [5].

Нейронное обеспечение реализации приобретенного опыта меняется с течением времени. Так, например, было показано, что амплитуда вызванных потенциалов мозга человека различается при реализации опыта в первый и второй день после формирования декларативной памяти [6]. Характеристики нейронной импульсной активности также различаются, например, при реализации пищедобывательного навыка у животных в течение первой недели после формирования навыка и в течение второй недели [7]. В то же время известно, что реализация навыка приводит к его реконсолидации, т.е. консолидация памяти никогда не бывает окончательной [8]. Напоминание животным о ранее приобретенном опыте путем, например, помещения животного в частично совпадающую с ситуацией обучения обстановку также приводит к реконсолидации [9]. Такие процессы изменений систем более раннего опыта при формировании нового были названы аккомодационной реконсолидацией [10].

Ранее нами было показано, что формирование второго навыка, даже не связанного напрямую с первым навыком, и без воспроизведения первого навыка приводит к реактивации его нейронного обеспечения, т.е., возможно, к процессам реорганизации прошлого опыта [11].

Можно предположить, что введение латентного периода для приобретенных навыков будет приводить к изменению их реорганизации в процессе приобретения последующих навыков, при этом выраженность реактивации систем памяти первого навыка может зависеть от истории обучения первому навыку.

Для уточнения этих вопросов мы последовательно обучали животных (крысы Long-Evans) двум пищедобывательным навыкам, выполняемым на первой и второй стороне инструментальной клетки. Причем между формированием первого и второго навыка был введен латентный период, т.е. период неиспользования первого навыка, длительностью 2 недели, а обучение первому навыку у двух групп животных проводилось либо поэтапно (группа «многоэтапное предварительное обучение»), либо сразу в один этап (группа «одноэтапное предварительное обучение»). Пищедобывательное поведение заключалось в нажатии на педаль для получения пищи в клетке, содержащей кормушку и педаль на правой стороне и кормушку и педаль на левой стороне.

Многоэтапное обучение первому навыку проводилось в течение 5 дней и включало следующие этапы. В первую 30-минутную экспериментальную сессию (первый день) животные получали пищу за нахождение рядом с кормушкой, во второй день – за поворот головы в сторону педали, в третью экспериментальную сессию – за отход от кормушки, далее, на четвертый день, – за подход к педали, затем, на пятый, – за нажатие на педаль. Одноэтапное обучение проводилось также в течение 5 дней, однако на протяжении всего этого времени животные получали пищу лишь в случае нажатия на педаль.

Сразу после завершения последней сессии животные обеих групп помещались в домашние клетки, где находились на протяжении 2 недель. Животные имели свободный доступ к пище и воде. Спустя 2 недели производилось обучение животных обеих групп второму навыку: пищедобывательному инструментальному навыку нажатия на педаль на второй, противоположной, левой стороне клетки за одну сессию (правая педаль и правая кормушка были отключены). После обучения проводился анализ экспрессии c-Fos в ретросплениальной коре (которая содержит большое число нейронов, связанных с данным поведением) головного мозга животных обеих групп, а также животных группы контроля из домашней клетки для оценки выраженности процессов аккомодационной реконсолидации.

Было обнаружено, что животные, обучавшиеся предварительно в один или несколько этапов, демонстрируют при втором обучении после латентного периода схожие паттерны поведения (рис. 1 и 2 соответственно).

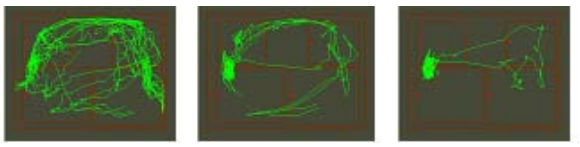


Рис. 1. Видеотреки поведения репрезентативного животного группы «одноэтапное предварительное обучение» во время сессии формирования второго навыка на второй стороне (1'–10', 11'–20' и 21'–30' периоды сессии соответственно)

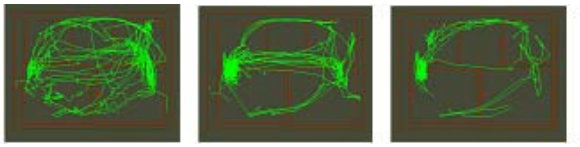


Рис. 2. Видеотреки поведения репрезентативного животного группы «многоэтапное предварительное обучение» во время сессии формирования второго навыка на второй стороне (1'–10', 11'–20' и 21'–30' периоды сессии соответственно)

Животные двух групп не различались по эффективности формирования второго навыка: число входов в зону эффективной кормушки у них было одинаковым за последнюю сессию. Однако по другим поведенческим параметрам (скорости передвижения, длине трека и числу входов в зону неэффективной педали) можно было сделать заключение, что животные группы «многоэтапное предварительное обучение» после латентного периода лучше помнили свой предыдущий, первый, опыт. По этим параметрам животные этой группы были сходны с животными, обучавшимися второму навыку на второй стороне сразу после формирования первого навыка на первой стороне [12].

В целом, животные, обучавшиеся второму навыку после латентного периода, посещали неэффективную педаль меньше, чем животные, обучавшиеся второму навыку непосредственно после обучения первому. При этом достоверных отличий между числом Fos-положительных нейронов в группах «одноэтапного предварительного обучения» и «многоэтапного предварительного обучения» при формировании второго навыка после латентного периода не обнаружилось. То есть у группы «одноэтапного предварительного обучения» после латентного периода число таких клеток снижалось по сравнению с ситуацией обучения второму навыку без латентного периода, т.е. сразу после первого [12]. Обе группы животных, обучавшиеся второму навыку после латентного периода, демонстрировали экспрессию c-Fos в меньшем числе нейронов по сравнению с обеими группами, обучавшимися второму навыку непосредственно после обучения предшествующему (рис. 3).

Ранее нами было показано, что реактивацию нейронных групп первого навыка при формировании второго навыка можно продемонстрировать, если первый навык опосредуется активностью нейронов, локализация которых легко осуществима [11]. В качестве первого навыка использовался навык касания вибриссной подушкой (либо левой, либо правой) рычага для получения капли воды, а известно, что «вибриссное» поведение опосредуется активностью нейронов бочонковых полей соматосенсорной коры. В качестве второго навыка использовалось уже описанное пищедобывательное поведение – нажатие на педаль. Было показано, что при формировании второго «невибриссного» навыка число Fos-положительных нейронов в бочонковом поле соматосенсорной коры, контралатеральном к стороне ранее (при реализации первого навыка) используемой вибриссной подушки, достоверно больше, чем в ипсилатеральном бочонковом поле (рис. 4).

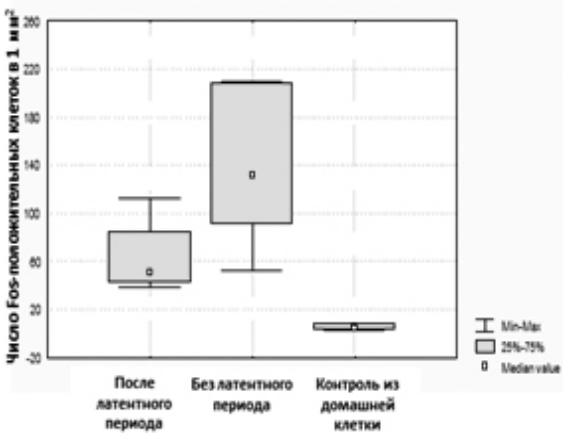


Рис. 3. Число Fos-положительных нейронов в ретросплениальной коре животных группы «с латентным периодом», группы «без латентного периода» и группы «контроль»)

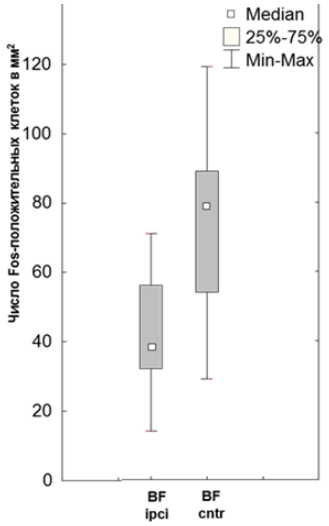


Рис. 4. Число Fos-положительных нейронов в бочонковом поле соматосенсорной коры у животных, обучавшихся второму пищевому навыку после первого питьевого, осуществляемого с помощью вибрисс (модифицировано из [11])

Введение латентного периода длительностью две недели между обучениями этим навыкам привело к отсутствию различий между разнополушарными бочонковыми полями по числу Fos-положительных нейронов (рис. 5).

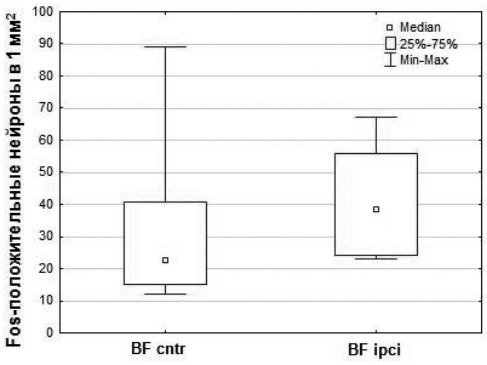


Рис. 5. Число Fos-положительных нейронов в бочонковом поле соматосенсорной коры у животных, обучавшихся после 2-недельного латентного периода второму пищевому навыку после первого питьевого, осуществляемого с помощью вибрисс. (BF – бочонковое поле, cntr – контралатеральная сторона по отношению к стороне используемой вибриссной подушки, ipci – ипсилатеральное полушарие по отношению к стороне используемой подушки)

Таким образом, полученные данные показывают, что навык, приобретенный первым, претерпевает изменения за время неиспользования, что приводит к меньшей выраженности процессов его реорганизации при формировании второго навыка. Причем этот эффект не зависит от того, насколько разными являются два последовательно формируемых навыка: оба навыка являются пищевыми, осуществляемыми на разных сторонах клетки, или навыки являются разными (питьевым и пищевым), осуществляемыми в разных поведенческих клетках.

Исследование поддержано грантом РГНФ № 14-06-00155а.

Литература

1. *Drosopoulos S., Wagner U., Born J.* Sleep enhances explicit recollection in recognition memory // Learn. Mem. 2005. V. 12, № 1. P. 44–51.

2. *Stickgold R., Whidbee D., Schirmer B., Patel V., Hobson J.A.* Visual discrimination task improvement: A multi-step process occurring during sleep // J. Cogn. Neurosci. 2000. V. 12, № 2. P. 246–254.

3. *Kuriyama K., Stickgold R., Walker M.P.* Sleep-dependent learning and motor-skill complexity // Learn. Mem. 2004. V. 11, № 6. P. 705–713.

4. *Diekelmann S., Wilhelm I., Born J.* The whats and whens of sleep-dependent memory consolidation // Sleep Med. Rev. 2009. V. 13, № 5. P. 309–321.

5. *Wilhelm I., Diekelmann S., Molzow I., Ayoub A., Mölle M., Born J.* Sleep selectively enhances memory expected to be of future relevance // J. Neurosci. 2011. V. 31, № 5. P. 1563–1569.

6. *Palmer S.D., Havelka J., van Hooff J.C.* Changes in Recognition Memory over Time: An ERP Investigation into Vocabulary Learning // PLoS One. 2013. V. 8, № 9. P. e72870.

7. *Созинов А.А.* Изучение реорганизации опыта индивида при научении по показателям мозгового обеспечения дефинитивного поведения // Развитие психологии в системе комплексного человекознания. Ч. 2 / отв. ред. А.Л. Журавлев, В.А. Кольцова. М. : Институт психологии РАН, 2012. С. 688–691.

8. *Dudai Y.* The restless engram: consolidations never end // Annu. Rev. Neurosci. 2012. V. 35. P. 227–247.

9. *Амельченко Е.М., Зворыкина С.В., Безряднов Д.В., Чехов С.А., Анохин К.В.* Восстановление нарушенной памяти и экспрессия гена c-fos в мозге амнестичных животных в ответ на напоминающие воздействия // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2012. Т. 153, № 5. С. 698–702.

10. *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 behavior // Acta Physiol. Scand. 2001. V. 171. P. 87–97.

11. *Сварник О.Е., Анохин К.В., Александров Ю.И.* Опыт первого, «вибриссного», навыка влияет на индукцию экспрессии c-Fos в нейронах бочонкового поля соматосенсорной коры крыс при обучении второму, «невибриссному», навыку // Журнал высшей нервной деятельности. 2014. Т. 63, № 6. С. 77–81.

12. *Svarnik O.E., Bulava A.I., Alexandrov Yu.I.* Expression of c-Fos in the rat retrosplenial cortex during instrumental re-learning of appetitive bar-pressing depends on the number of stages of previous training // Frontiers in Behavioral Neuroscience. 2013. V. 7. P. 78.

Ритмы головного мозга: абсанс-эпилепсия и сонные веретена

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

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

Электроэнцефалография – традиционный метод нейрофизиологического исследования человека и животных, с помощью которого регистрируют электрическую активность головного мозга с поверхности головы. Электроэнцефалогамма (ЭЭГ) несет важную информацию о работе головного мозга в норме и при патологии, о когнитивных процессах и характере мыслительной деятельности.

Этот метод был введен в практику немецким психиатром Хансом Бергером (Hans Berger) в начале XX века. В своей первой публикации в 1929 году Х. Бергер представил 73 записи ЭЭГ человека и описал изменения ритмической активности, связанные с процессом мышления [1]. Со временем метод был существенно усовершенствован благодаря внедрению новых инженерных и компьютерных технологий. На смену чернильному самописцу пришла система цифровой записи ЭЭГ, позволившая проводить многоканальную регистрацию с высоким временны́м разрешением. Сформировался принципиально новый подход к анализу цифровых данных ЭЭГ, где сигнал представлен в виде временного ряда – последовательности дискретных значений электрического потенциала, зарегистрированных с миллисекундной задержкой. Несмотря на развитие новых методов нейровизуализации и нейрокартирования, традиционные исследования ЭЭГ остаются наиболее востребованным в клинической практике, они недороги и абсолютно необходимы для диагностики всех форм эпилепсии. Надежность и доступность – неоспоримые достоинства электроэнцефалографии. Использование мощных средств физико-математического анализа ЭЭГ дает возможность выявить механизмы работы головного мозга.

На ЭЭГ человека и животных можно выделить множество разнообразных ритмов и периодических колебаний, имеющих нормальную и пароксизмальную природу. Отдельного внимания заслуживает феномен синхронизации, когда устойчивая активность ритмической активность наблюдается одновременно в нескольких областях головного мозга. Синхронизация ритмической активности на ЭЭГ сопровождает когнитивные процессы и свидетельствует об установлении функциональных связей между «синхронизированными» областями головного мозга [2, 3]. Аномально высокая синхронизация ЭЭГ может быть признаком патологии.

Гиперсинхронная активность, появляющаяся на ЭЭГ в виде комплексов пик – волна, служит диагностическим признаком абсанс-эпилепсии. У человека частота эпилептических пик-волновых разрядов (ПВР) составляет 3 Гц. Аналогичные ПВР можно зарегистрировать на ЭЭГ у крыс линии WAG/Rij (рис. 1), которые имеют генетическую склонность к абсанс-эпилепсии и являются животной моделью этого заболевания [4].

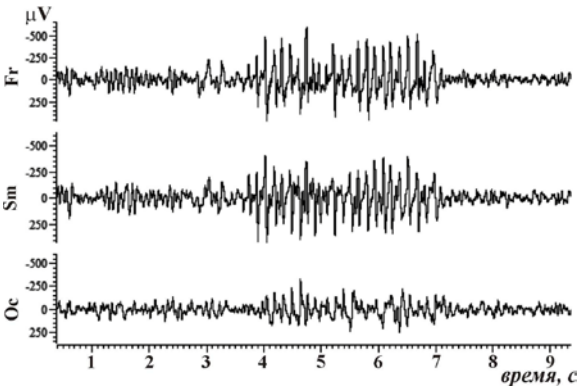


Рис. 1. Пик-волновый разряд (ПВР) на ЭЭГ во время приступа абсанс-эпилепсии у крысы линии WAG/Rij. Электроды расположены в коре правого полушария в лобной (Fr), париетальной (соматосенсорной, Sm) и затылочной (Oc) областях

Исследование ЭЭГ остаётся единственным методом диагностики абсанс-эпилепсии. Приступы абсанс-эпилепсии не сопровождаются моторными нарушениями, а проявляются в виде кратковременной утраты внимания, рассредоточения и напоминают легкую дремоту, поэтому существует серьезный риск, что эта болезнь останется незамеченной.

У человека и животных приступы абсанс-эпилепсии начинаются внезапно и непредсказуемо при отсутствии явных изменений, таких как, например, аура перед началом больших судорожных припадков. В связи с этим раскрытие механизмов инициации пик-волновых разрядов имеет важное диагностическое и прогностическое значение. С целью выявить ритмическую активность, предшествующую началу ПВР у крыс WAG/Rij, мы провели частотно-временной анализ ЭЭГ с использованием вейвлетов [5–7].

Вейвлетный анализ

В основе метода лежит непрерывное вейвлетное преобразование, представляющее собой свертку исследуемого сигнала ЭЭГ, $x(t)$, и набора базисных функций $\varphi_{s,\tau}$:

$$W(s,\tau)=\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\varphi^{*}_{s,\tau}(t)dt\,, \qquad \varphi_{s,\tau}(t)=\frac{1}{\sqrt{s}}\varphi_0\left(\frac{t-\tau}{s}\right),$$

где s – временной масштаб, определяющий растяжение или сжатие материнской функции, τ – временной сдвиг вейвлетного преобразования, $\varphi_0(\eta)$ – материнский вейвлет, в качестве которого была использована комплексная функция – вейвлет Морле (базис, дающий наиболее полное частотно-временное разрешение вейвлетного спектра):

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{j\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2}.$$

В результате преобразования были получены вейвлетные поверхности (рис. 2), в которых для удобства интерпретации значения временны́х масштабов *s* были преобразованы в частоту *fs*, аналогичную частоте фурье-спектра (*fs* = 1/*f*).

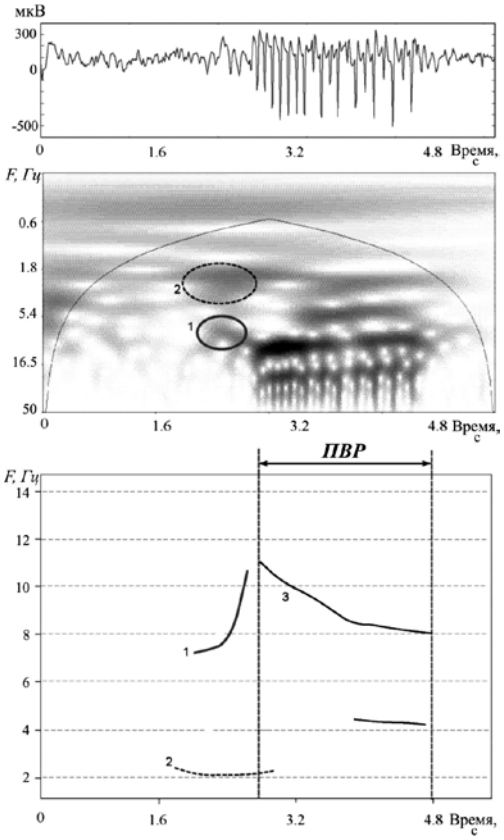


Рис. 2. Пик-волновый разряд (ПВР) и предшествующая ему активность на лобной ЭЭГ у крысы WAG/Rij, соответствующий вейвлетный спектр и скелетон вейвлетной поверхности. Цифрами обозначены *тета*- и *дельта*-предшественники ПВР (*1* и *2*) а также динамика основной частоты ПВР (*3*)

Ритмические предшественники ПВР

Использование вейвлетного анализа позволило выявить особенности частотно-временной структуры ЭЭГ с высоким разрешением во времени, благодаря чему нам удалось впервые обнаружить короткие эпизоды ритмической активности на ЭЭГ, предшествующие началу ПВР [8].

Эксперимент был проведен на 6 крысах линии WAG/Rij в возрасте около 1 года, у которых регистрировали электрическую активность головного мозга в свободном поведении с помощью вживленных электродов, что дало возможность получить устойчивый сигнал от локальных областей головного мозга в течение длительного времени (от 6 до 24 часов). Строго говоря, сигнал, зарегистрированный таким образом от поверхности коры больших полушарий, является электрокортикограммой (ЭКоГ), и его частотно-временной состав аналогичен таковому у сигнала ЭЭГ, зарегистрированного от кожи головы (стандартный протокол у человека), однако имеет низкий уровень шума, поскольку регистрирующий электрод находился в контакте с источником электрической активности. Последнее обстоятельство значительно облегчало задачу выделения отдельных ритмических компонентов сигнала. Во избежание путаницы для обозначения наших экспериментальных данных мы будем использовать привычный термин ЭЭГ.

С помощью вейвлетного анализа ЭЭГ в группе крыс были обнаружены короткие ритмические компоненты перед началом ПВР (рис. 2), максимальная мощность которых находилась в диапазоне дельта- и тета-частот (3–5 и 7–11 Гц соответственно, *дельта*- и *тета*-предшественники) [8].

Средняя частота *тета*-предшественника ПВР составила 8,6 Гц, и эта активность аналогична 5–9 Гц ритмическим колебаниям, выявленным перед началом ПВР у крыс GAERS [9]. *Дельта*-предшественник – это новый про-эпилептический элемент на ЭЭГ, о существовании которого до сих пор не было известно.

По нашим данным, *дельта*- и *тета*-компоненты появлялись на ЭЭГ в лобной коре и в таламусе практически одновременно за несколько секунд до начала ПВР. В таблице показан процент времени, в течение которого наблюдалось одновременное появление *дельта*- и *тета*-компонентов на ЭЭГ у крыс WAG/Rij в разных физиологических состояниях:

Физиологическое состояние	Дельта + тета, %
Перед началом ПВР	79,0
Активное бодрствование	8,6
Пассивное бодрствование	12,9
Поверхностный сон	9,3
Глубокий сон	2,2

Таким образом, сочéтанное появление коро тких эпизодов ритмической активности в диапазоне дельта- и тета-частот – аномалия, характеризующая состояние «судорожной готовности» при абсанс-эпилепсии.

Сонные веретена

Одной из наиболее выразительных форм ритмической активности на ЭЭГ являются сонные веретена [10]. Они появляются во время второй фазы сна (медленный сон у животных), имеют вид веретенообразных колебаний (из-за постепенно нарастающей и убывающей амплитуды), частоту 8–14 Гц и длятся 0,5–1,5 с (рис. 3).

Как известно, сонные веретена формируется в результате синхронизации активности нейронов

среднего мозга (таламуса) при участии коры больших полушарий [10]. Нейроны таламуса (специфические ядра) в состоянии бодрствования обеспечивают проведение внешней информации от периферии к высшим отделам анализаторов в коре, являясь «сенсорными воротами» головного мозга. В состоянии сна эта функция не реализуется, и в это время таламус генерирует автономный ритм с частотой 10–12 Гц, который передается в кору и может быть зарегистрирован в виде сонных веретен.

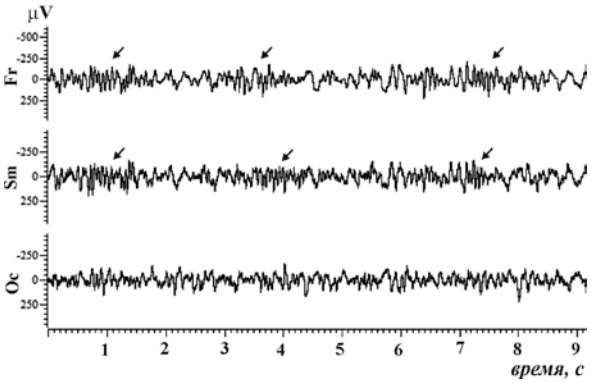


Рис. 3. Сонные веретена на ЭЭГ у крысы линии WAG/Rij (отмечены стрелочками), зарегистрированные в правом полушарии лобной (Fr), париетальной (соматосенсорной, Sm) и затылочной (Oc) коры

В последнее десятилетие неуклонно растет интерес исследователей к сонным веретенам [11]. Были выявлены корреляции между свойствами сонных веретен и заболеваниями нервной системы (например, шизофрении, болезни Паркинсона, Альцгеймера, умственная отсталость [12, 13]), процессами восстановления после инсульта, а также когнитивными способностями и качеством сна [14, 15].

Частота сонных веретен является информативным параметром, характеризующим свойства таламо-кортикальной системы [11]. Прямые исследования сонных веретен у больных, страдающих абсанс-эпилепсией, не позволяют сделать однозначные выводы об изменении структуры сонных веретен при развитии данной болезни. Для того чтобы восполнить этот пробел, мы исследовали изменения частотно-временных свойств сонных веретен по мере прогрессирующего развития абсанс-эпилепсии у крыс линии WAG/Rij. У большинства особей этой линии интенсивность эпилептических разрядов появляется в возрасте 3–5 месяцев и значительно увеличивается с возрастом [16].

Мы провели подробный частотно-временной анализ сонных веретен на ЭЭГ у крыс линии WAG/Rij с использованием «скелетонов» вейвлетной поверхности [17]. Исследовали распределения вейвлетной энергии во времени, а также мгновенные распределения энергии вейвлетного преобразования в течение сонного веретена. Несмотря на малую длительность сонного веретена (от 300 мс, что соответствует 3–4 периодам колебаний), была обнаружена сложная динамика частоты в течение сонного веретена. Для отображения этой динамики были построены хребты («скелетоны») вейвлетной поверхности. В каждый момент времени был установлен максимум энергии и соответствующее значение частоты. Результатом этой процедуры являлось двумерное распределение, дававшее четкое представление о доминирующей частоте сонного веретена и о динамике частоты (рис. 4).

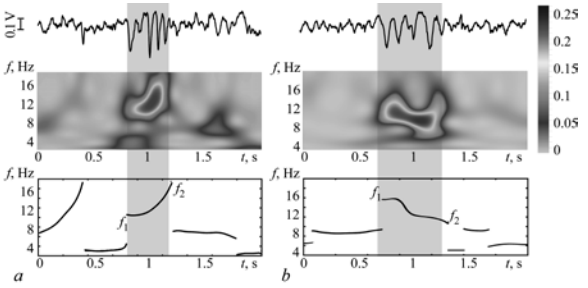


Рис. 4. Примеры сонных веретен на лобной ЭЭГ, соответствующие вейвлетные поверхности и отображение ведущих частот (хребты, или «скелетоны», вейвлетных поверхностей). Значения мгновенных частот в начале и в конце сонного веретена – f_1 и f_2

Обнаружено, что у крыс до появления признаков эпилепсии (в возрасте 5 месяцев) сонные веретена демонстрировали увеличение мгновенной частоты от начала (в среднем 10,4 Гц) к концу веретена (в среднем 11,4 Гц). В возрасте 7 и 9 месяцев на ЭЭГ появлялись зрелые эпилептические разряды (симптоматическая стадия) и исчезала динамика частоты в течение сонных веретен [18].

Исчезновение поступательной динамики частоты во время сонных веретен, по-видимому, обусловлено прогрессирующим нарушением нейронных механизмов таламо-кортикальной системы при развитии абсанс-эпилепсии. Это свойство может быть использовано для доклинической диагностики абсанс-эпилепсии.

Несмотря на их актуальность, исследования сонных веретен сопряжены с рядом технических трудностей, вызванных нечеткостью определения электроэнцефалографического паттерна сонных веретен. Проблему осложняет отсутствие общих стандартов выделения сонных веретен на ЭЭГ, многообразие автоматизированных методов обнаружения при низком уровне воспроизводимости характеристик сонных веретен, отсутствие стандартизированной базы данных и наличие несоответствий в методах, используемых для оценки производительности автоматизированных систем распознавания сонных веретен. В наших работах мы интегрируем собственный опыт и результаты, полученные зарубежными коллегами, с целью повысить эффективность исследования сонных веретен в экспериментальной и клинической нейрофизиологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-04-00084-а, 14-02-31235), финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям на 2014 год и плановый период 2015 и 2016 годов, а также Фон-

да содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (конкурс «У.М.Н.И.К.», договор № 0002038).

Литература

1. *Berger H.* Über das Elektrenkephalogram des Menschen // Arch. f. Psychiat. 1929. № 87. P. 527–570.

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

3. *Свидерская Н.* Синхронная электрическая активность мозга и психические процессы. М. : Наука, 1987. 156 с.

4. *Depaulis A., van Luijtelaar E.L.J.M.* Genetic models of absence epilepsy in the rat // Models of seizures and epilepsy. Amsterdam : Elsevier Academic Press, 2005. P. 233–248.

5. *Павлов А.Н. и др.* Вейвлет-анализ в нейродинамике // УФН. 2012. Т. 182, вып. 9. С. 905–939.

6. *Короновский А.А. и др.* Вейвлеты в нейродинамике и нейрофизиологии. М. : Физматлит, 2013. 272 с.

7. *Ситникова Е.Ю., Короновский А.А., Храмов А.Е.* 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.

8. *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. V. 122. P. 687–695. doi:10.1016/j.clinph.2010.10.038.

9. *Pinault D., Vergnes M., Marescaux C.* Medium-voltage 5–9 Hz oscillations give rise to spike-and-wave discharges in a genetic model of absence epilepsy: in vivo dual extracellular recording of thalamic relay and reticular neurons // Neurosci. 2001. V. 105. P. 181–201.

10. *De Gennaro L., Ferrara M.* Sleep spindles: an overview // Sleep Med. Rev. 2003. V. 7, № 5. P. 423–440.

11. *Urakami Y., Ioannides A.A., Kostopoulos G.K.* Sleep spindles as a biomarker of brain function and plasticity // Advances in clinical neurophysiology. InTech. 2012. doi: 10.5772/48427.

12. *Christensen J.A.E. et al.* Sleep spindle alterations in patients with Parkinson's disease // Front. Hum. Neurosci. 2015. V. 9. P. 233. doi: 10.3389/fnhum.2015.00233.

13. *Manoach D.S. et al.* Sleep spindle deficits in antipsychotic-naïve early course schizophrenia and in non-psychotic first-degree relatives // Front. Hum. Neurosci. 2014. V. 8. P. 762. doi: 10.3389/fnhum.2014.00762.

14. *Bódizs R. et al.* Sleep spindling and fluid intelligence across adolescent development: sex matters // Front. Hum. Neurosci. 2014. V. 8. P. 952. doi: 10.3389/fnhum. 2014.00952.

15. *Nader R.S., Smith C.T.* Correlations between adolescent processing speed and specific spindle frequencies // Front. Hum. Neurosci. 2015. V. 9. P. 30. doi: 10.3389/ fnhum.2015.00030.

16. *Coenen A.M., van Luijtelaar E.L.* The WAG/Rij rat model for absence eplepsy, age and sex factors // Epilepsy Res. 1987. V. 1. P. 297–301.

17. *Грубов В.В. и др.* Частотно-временной анализ характерных паттернов активности нейронных ансамблей головного мозга при помощи непрерывного вейвлетного преобразования // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78, вып. 12. С. 1523–1527.

18. *Sitnikova E. et al.* Age-dependent increase of absence seizures and intrinsic frequency dynamics of sleep spindles in rats // Neurosci. J. 2014. Art. ID 370764. doi:10.1155/2014/370764.

Показатели стабильности и динамики мозгового обеспечения нового поведения

А.А. Созинов, Ю.В. Гринченко, С.А. Казымаев, Ю.И. Александров

Институт психологии РАН, Москва

Введение

Исследования с избирательной инактивацией зон мозга и регистрацией суммарных показателей активности нейронов показывают, что мозговое обеспечение поведения меняется по мере тренировки, при том что показатели его эффективности уже стабилизировались (например, [5, 11]). В то же время связь активности нейронов с выполнением поведения сохраняется в течение длительных периодов регистрации [3, 13, 14].

Используя принципы системно-эволюционного подхода (в том числе постоянство специализации нейрона [6], мы выделили показатели активности нейронов, которые с различной степенью специфичности характеризуют вовлечение нейрона в обеспечение поведения. Цель настоящего исследования – изучение мозгового обеспечения сложных форм поведения на последовательных стадиях его формирования и выявление стабильных и изменяющихся показателей нейронной активности.

Один из ключевых аспектов процесса научения – это вовлечение прошлого опыта индивида [8], приводящее к его модификации [1, 12]. Таким образом, мы рассматриваем научение как единство двух процессов: формирования нового опыта и модификации ранее сформированного опыта [2]. Можно предположить, что формирование нового и модификация прошлого опыта выражаются в динамике различных показателей активности нейронов.

При повторном выполнении поведения выявляется динамика активации передней и задней областей цингулярной коры мозга животных [9] и человека [15]. В инструментальном поведении степень вовлечения передней цингулярной коры выше на ранних этапах формирования поведения, а задней цингулярной коры – на более поздних [10]. Поэтому мы сопоставили показатели нейронной активности, зарегистрированной в этих зонах мозга в течение первой и второй недель после обучения животных новому инструментальному поведению.

Методика

Для решения сформулированных задач использовали циклическое инструментальное пищедобывательное поведение (см. подробно в [1, 6]), реализуемое обученными кроликами в экспериментальной камере, по боковым сторонам которой в смежных углах располагаются пары: кормушка и педаль. Нажатие педали на левой или правой стороне клетки приводит к автоматической подаче соответственно левой или правой кормушки.

Обучение животных проводили поэтапно (захват пищи из кормушки, поворот от кормушки в сторону педали, подход к педали, нажатие на педаль и отход от педали, подход к кормушке) – по 5 этапов на каждой стороне экспериментальной камеры. Таким образом, обучение проводили в 10 этапов, которые служили основой для выделения актов поведения при последующем анализе нейронной активности. После обучения животные выполняли циклическое поведение (от кормушки к педали и обратно), в котором циклы состояли из 5 актов на каждой стороне клетки.

Регистрацию активности нейронов проводили последовательно в передней и задней областях цингулярной коры в остром эксперименте. Запись активности нейронов одной области начинали в день обучения нажатию на обе педали или на следующий день и продолжали 4–5 дней. Затем с этим же животным эксперимент продолжали, и активность нейронов регистрировали в другой области цингулярной коры. У одной группы животных сразу после обучения нажатию на педали осуществляли запись активности нейронов передней цингулярной коры (координаты: AP от –3 до –4 мм, ML от +1 до +2 мм). Затем в дефинитивном поведении проводили запись активности нейронов задней цингулярной коры (координаты: AP от +9 до +10 мм, ML от +1 до +2 мм). У второй группы животных последовательность зон регистрации была обратной.

В ходе записи активности каждого нейрона животное совершало 10–15 циклов поведения на каждой стороне камеры. Параллельно с записью нейронной активности (усиленного и отфильтрованного сигнала с регистрирующего электрода) осуществляли запись ряда отметок границ поведенческих актов. Все сигналы синхронно записывали на магнитограф НО-67, а также на жесткий диск компьютера с помощью программы L-Graph2 и АЦП L-Card E14-440. Одновременно с этим осуществляли видеозапись каждой экспериментальной сессии. Последующий анализ данных проводили с помощью программ D-Main4 (Ю.В. Райгородский, модифицирована А.К. Крыловым) и Neuru (А.К. Крылов). Он включал сортировку и классификацию потенциалов действия каждого нейрона, идентификацию границ актов поведения и расчеты, в частности частоты спайков в каждом акте поведения.

Дальнейший анализ был направлен на классификацию нейрона как неидентифицированного или специализированного, на выявление типа специализации каждого из специализированных нейронов (относительно систем разного «возраста»). Качественные и количественные критерии, разра-

ботанные нами для установления специализации нейронов, а также способы регистрации активности и поведенческих отметок были описаны ранее [7]. Для каждого нейрона подсчитывали среднюю частоту спайков за все время его регистрации. За активацию в данном акте принимается превышение частоты спайков в этом акте по отношению к средней за все время регистрации не менее чем в 1,5 раза.

Далее вычисляли вероятность активации в каждом из 10 актов поведения. За специализированный относительно системы определенного акта принимали нейрон, вероятность активации которого в данном акте равна единице. Такие акты называли специфическими и наряду с дополнительными тестами (анализ активности нейрона при ориентировочно-исследовательском, поисковом, «ошибочном», пассивно-оборонительном и других видах поведения) считали показателем специализации нейрона. Акты с вероятностью активации не менее 0,4 и менее 1 (относительно систем которых нейрон не специализирован) называли неспецифическими и рассматривали как показатель взаимоотношений данного нейрона с нейронами других специализаций (межнейронные отношения, отражающие отношения между системами, к которым эти нейроны принадлежат [4, 7].

Для каждого нейрона, имеющего по крайней мере один неспецифический акт, вычисляли среднюю частоту спайков в неспецифических актах и количество этих актов. Для нейронов с одним или более специфическим актом вычисляли среднюю частоту спайков в специфических актах. Перечисленные показатели активности нейронов четырех групп (на первой и второй неделе эксперимента в передней и задней цингулярной коре) сопоставляли с помощью пакетов программ Microsoft Excel и SPSS 11.0. Соотношение долей нейронов разных типов специализации сравнивали с помощью точного критерия Фишера. Для анализа средней частоты спайков нейронов и количества актов использовали непараметрический критерий Манна – Уитни, а также дисперсионный анализ нормализованных данных.

Результаты

В ходе выполнения животными инструментального пищедобывательного поведения зарегистрирована активность 116 нейронов. Из них 84 нейрона были отнесены к числу неидентифицированных, 29 классифицированы как Н-нейроны и 3 – как С-нейроны.

Доля Н-нейронов оказалась сходной на первой и второй неделе эксперимента как в передней (8/32 и 5/27), так и в задней (8/29 и 8/28) зонах цингулярной коры мозга животных (критерий «хи-квадрат», $p > 0,5$). В то же время доли Н-нейронов, специализированных относительно подхода к педали или подхода к кормушке, оказались различными. Так, нейронов, специализированных относительно подхода к кормушке, больше на первой неделе регистрации, чем на второй ($\chi^2 = 8,98$; $p = 0,003$), а нейронов, специализированных относительно подхода к педали, наоборот, больше на второй неделе ($\chi^2 = 12,27$; $p < 0,001$). При этом доли этих нейронов в передней и задней зонах цингулярной коры оказались сходными ($p > 0,2$).

Анализ средней частоты активности нейронов позволил выявить, что у нейронов передней цингулярной коры средняя частота спайков во всей записи, частота спайков в актах со специфической активацией и частота в актах с неспецифической активацией меньше на второй неделе эксперимента, чем на первой. Это различие оценивали с помощью сопоставления указанных показателей у нейронов передней цингулярной коры на первой и второй неделе эксперимента, а также у нейронов передней и задней цингулярной коры на второй неделе эксперимента. Оба сравнения выявили достоверные различия только для неидентифицированных нейронов по показателям средней частоты спайков во всей записи (критерий Манна – Уитни, $U = 77,0$; $p < 0,001$ между неделями и $U = 89,0$; $p = 0,005$ между зонами коры на второй неделе) и средней частоты спайков в актах с неспецифической активацией (соответственно $U = 71,0$; $p = 0,016$ и $U = 38,0$; $p = 0,010$). У специализированных нейронов уровня значимости достигли только различия между неделями регистрации у Н-нейронов передней цингулярной коры по показателю средней частоты спайков во всей записи ($U = 5,0$; $p = 0,028$) и средней частоты спайков в актах со специфической активацией ($U = 6,0$; $p = 0,040$).

У нейронов задней цингулярной коры никаких различий между неделями регистрации выявлено не было ($p > 0,3$). Применение дисперсионного анализа средней частоты спайков во всей записи ко всей выборке нейронов (факторы «зона мозга», «этап научения» и «специализация нейрона») позволило выявить основной эффект «зоны мозга» (частота спайков нейронов задней цингулярной коры выше, чем передней; $F_{1,103} = 3,94$; $p < 0,05$) и взаимодействие факторов «зона мозга» и «этап научения» (частота различается между неделями только в передней цингулярной коре; $F_{1,103} = 3,96$; $p < 0,05$). Подобный анализ средней частоты в актах с неспецифической активацией выявил взаимодействие факторов «зона мозга» и «этап научения» ($F_{1,72} = 3,98$; $p < 0,05$). Таким образом, частота спайков нейронов передней цингулярной коры выше на первой неделе регистрации, чем на второй.

Анализ количества актов с неспецифической активацией у неидентифицированных нейронов показал, что этот показатель у нейронов задней цингулярной коры на первой неделе эксперимента ниже по сравнению со второй неделей ($U = 90,0$; $p = 0,018$), а также по сравнению с нейронами передней цингулярной коры на первой неделе ($U = 124,5$; $p = 0,015$). Различий между первой и второй неделей у нейронов передней цингулярной коры, а также между зонами коры на второй неделе не выявлено ($p > 0,2$). У специализированных нейронов никаких значимых различий между группами не выявлено ($p > 0,3$). Таким образом,

количество актов с неспецифической активацией у неидентифицированных нейронов задней цингулярной коры выше на второй неделе эксперимента, чем на первой.

Обсуждение результатов и выводы

Согласно полученным данным, доля специализированных нейронов, зарегистрированных на первой и второй неделе после обучения новому поведению, не различается ни в передней, ни в задней цингулярной коре мозга кроликов. Сопоставление показателей активности нейронов передней цингулярной коры показало, что средняя частота спайков нейронов этой зоны мозга выше на первой неделе регистрации по сравнению со второй, а количество актов с неспецифической активацией у неидентифицированных нейронов задней цингулярной коры выше на второй неделе эксперимента, чем на первой. Таким образом, выявленная нами динамика нейронного обеспечения поведения на ранних и поздних этапах научения описывается не столько показателями активности специализированных нейронов, специфически связанными с реализацией поведения, сколько средней частотой спайков или характеристиками активности неидентифицированных нейронов.

Доля Н-нейронов, специализированных относительно подхода к кормушке, оказалась больше на первой неделе регистрации, чем на второй, а нейронов, специализированных относительно подхода к педали, наоборот, больше на второй неделе. В силу малого размера выборки специализированных нейронов на данном этапе работы статистическую надежность этих различий мы считаем недостаточной. Однако, если принимать во внимание эти различия, следует заметить, что доли этих нейронов в передней и задней зонах цингулярной коры оказались сходными. Таким образом, динамика мозгового обеспечения поведения не описывается как «переход» активности, специфически связанной с выполнением поведения, из одной зоны мозга в другую.

Установление соответствия между показателями нейронной активности и процессами формирования нового опыта, а также модификации ранее сформированного опыта возможно только в исследовании с хронической регистрацией нейронной активности. В то же время одним из показателей модификации активности специализированных нейронов при формировании нового опыта считается появление дополнительных активаций [1]. Поэтому можно предположить, что увеличение количества активаций неидентифицированных нейронов задней цингулярной коры связано с реорганизацией прошлого опыта вследствие формирования нового (аккомодационной реконсолидацией).

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 14-06-00404а.

Литература

1. *Александров Ю.И.* Психофизиологическое значение активности центральных и периферических нейронов в поведении. М. : Наука, 1989.

2. *Александров Ю.И.* Научение и память: традиционный и системный подходы // ЖВНД. 2005. Т. 55, № 6. С. 842–860.

3. *Горкин А.Г., Шевченко Д.Г.* Стабильность поведенческой специализации нейронов // ЖВНД. 1990. Т. 40, № 2. С. 291–300.

4. *Горкин А.Г., Шевченко Д.Г.* Отражение истории обучения в активности нейронов лимбической коры кроликов // ЖВНД. 1993. Т. 43, № 1. С. 172–175.

5. *Роуз С.* Устройство памяти: от молекул к сознанию. М. : Мир, 1995.

6. *Швырков В.Б.* Введение в объективную психологию : нейрональные основы психики : избранные труды. М. : ИП РАН, 2006. 592 с.

7. *Alexandrov Yu.I., Grinchenko Yu.V., Järvilehto T.* Change in the pattern of behavioral specialization of neurons in the motor cortex of the rabbit following lesion of the visual cortex // Acta Physiologica Scandinavica. 1990. V. 139. P. 371–385.

8. *Brod G., Werkle-Bergner M., Shing Y.L.* The influence of prior knowledge on memory: a developmental cognitive neuroscience perspective // Frontiers in Behavioral Neuroscience. 2013. V. 7. Art. 139.

9. *Freeman J.H., Jr., Gabriel M.* Changes of cingulothalamic topographic excitation patterns and avoidance response incubation over time following initial discriminative conditioning in rabbits // Neurobiology of Learning and Memory. 1999. V. 72. P. 259–272.

10. *Gabriel M. et al.* Training-stage related neuronal plasticity in limbic thalamus and cingulate cortex during learning: a possible key to mnemonic retrieval // Behavioral Brain Research. 1991. V. 46. P. 175–185.

11. *Kelly A.M.C., Garavan H.* Human functional neuroimaging of brain changes associated with practice // Cerebral Cortex. 2005. V. 15, № 8. P. 1089–1102.

12. *Kuhl B.A., Bainbridge W.A., Chun M.M.* Neural reactivation reveals mechanisms for updating memory // The Journal of Neuroscience. 2012. V. 32, № 10. P. 3453–3461.

13. *McMahon et al.* Face-selective neurons maintain consistent visual responses across months // PNAS. 2014. V. 111, № 22. P. 8251–8256.

14. *Thompson L.T., Best P.J.* Long-term stability of the place-field activity of single units recorded from the dorsal hippocampus of freely behaving rats // Brain Research. 1990. V. 509. P. 299–308.

15. *Tracy J. et al.* Regional brain activation associated with different performance patterns during learning of a complex motor skill // Cerebral Cortex. 2003. V. 13, № 9. P. 904–910.

Кластерный анализ спонтанной активности нейрональных культур *in vitro*

И.С. Соколов

Курчатовский НБИКС-Центр (НИЦ «Курчатовский институт»), Москва

В настоящее время огромное количество исследований посвящено вопросам обработки и хранения информации. Существует множество подходов к решению данной проблемы. Один из возможных вариантов – это использование механизмов и алгоритмов, заложенных в центральной нервной системе живых организмов. В частности, существуют работы, демонстрирующие способность сети первично диссоциированных культур нейрональных клеток на мультиэлектродных матрицах воспроизводить биологические реакции, аналогичные обучению [1–6]. При данном подходе используются нейроны, взятые из мозга новорожденных мышей или крыс или из их эмбрионов. Данный метод позволяет непрерывно регистрировать биоэлектрическую активность культуры и одновременно воздействовать электрической стимуляцией на отдельные участки сети нейронов. С другой стороны, клеточная культура на матрице доступна для оптических микроскопических исследований с использованием флуоресцентных меток, как временно вводимых, так и с помощью встроенных в клетки трансгенных животных генов флуоресцентных белков.

В культуре нейрональных клеток в течение жизни возникает различная биоэлектрическая активность, регистрируемая электродами матрицы. Так, в первые дни развития присутствуют только отдельные спайки, но с течением времени спайки группируются, образуя пачки (малые пачечные события). Совокупность синхронизированных во времени пачек, образуемых на активных электродах, называется популяционной пачкой (популяционным пачечным событием). Однако в популяционной пачке малые пачечные события возникают с некоторой временной задержкой. Если в популяционном пачечном событии принять время начала t^k_{start} за возникновение первого спайка в первой по времени пачке, то можно сформировать вектор $\mathbf{V}_k$, размерность которого равна количеству активных электродов:

$$\mathbf{V}_k = \left\{ t_k(i) - t^k_{start} \right\}_{i=0}^{N} = (c_{k0} \dots c_{kN}), \qquad (1)$$

где $t_k(i)$ – начало активности на i-м электроде. Этот вектор называется фронтом пачечной активации [1].

Сегодня наиболее ясной экспериментальной моделью обучения нейрональной культуры является модель управления стимуляцией, предложенная в 2001 году Шахафом и Маромом [7] и успешно воспроизведенная другими авторами [5, 8–11]. В этой модели культура нейрональных клеток решает задачу отключения внешней стимуляции с помощью изменения электрической активности на выбранном экспериментатором электроде. Эта способность нейрональной культуры *in vitro* к обучению ставит вопрос о механизмах оценки успешности обучения сети. В рамках работы исследуется гипотеза, что оценка успешности обучения в сети нейронов связана с воспроизводимостью собственного паттерна активации. В этом случае паттерны спонтанной популяционной пачечной активности, формирующиеся в процессе развития нейрональной сети в культуре клеток, с течением времени не должны изменяться, если отсутствует внешнее воздействие. Соответственно при применении кластерного анализа для исследования биоэлектрической активности нейрональных культур следует ожидать выделения или одного кластера с большим количеством элементов, или множества кластеров с малым количеством элементов.

Для проведения кластерного анализа необходимы:

- вектор признаков пачечных событий. В качестве вектора был выбран фронт пачечной активации;
- метрики расчета расстояний. Для расчета сходства популяционных пачек использовалась метрика корреляции Пирсона. В этом случае расстояние d для векторов $\mathbf{v}$ и $\mathbf{u}$ будет рассчитываться по формуле

$$d = 1 - \frac{(\mathbf{u} - \bar{u}) \times (\mathbf{v} - \bar{v})}{\left\| (\mathbf{u} - \bar{u}) \right\|_2 \left\| \mathbf{v} - \bar{v} \right\|_2}; \qquad (2)$$

- алгоритм кластеризации. Для кластеризации использовался метод взвешенного попарного среднего. На каждом шаге в матрице расстояний ищется минимальное значение, соответствующее расстоянию между двумя наиболее близкими кластерами. Найденные кластеры u и v объединяются, образуя новый кластер k. Строки и столбцы, соответствующие кластерам u и v, выбрасываются из матрицы расстояний, и добавляется новая строка и новый столбец, соответствующие кластеру k. В результате матрица сокращается на одну строку и один столбец. Эта процедура повторяется до тех пор, пока не будут объединены все кластеры.

Если кластер k образован путем объединения кластеров u и v, то удаленность d кластера w от кластера k рассчитывается по следующей формуле:

$$d((u, v), w) = \frac{d_{u,w} + d_{v,w}}{2}. \qquad (3)$$

Для получения кластеров необходимо в упорядоченной последовательности векторов найти расстояния между соседними векторами, после чего на основании полученных расстояний опре-

делить пороговое значение *th*. Соседние векторы, расстояния между которыми меньше порогового, образуют кластеры.

Пороговое значение *th* определяется следующим образом: строятся гистограммы для расстояний между всеми пачечными событиями для реальных векторов пачечных событий и для векторов пачечных событий, в которых электроды перемешаны случайным образом. Затем определяется точка пересечения этих гистограмм, и значение расстояния между векторами в этой точке будет являться порогом.

В рамках работы было высажено 6 культур с нейронами из гиппокампа и 7 культур с нейронами из коры. Регистрация активности проводилась с 4-го дня возраста культуры. На 4-й день все культуры, за исключением 2 корковых, проявляли спайковую активность. У всех гиппокампальных культур к 10-му дню проявилась популяционная пачечная активность. Однако только у 2 культур стабильно наблюдалась спонтанная активность. У 2 корковых культур пачечная активность проявилась на 10-й день и продлилась до 16-го дня, после чего осталась только спайковая активность. К 26-му дню все кортикальные культуры погибли.

В результате кластерного анализа зарегистрированной электрофизиологической активности было выделено 5 основных кластеров по 68–336 элементов и 6 кластеров меньшего размера – по 6–26 элементов. Это согласуется с гипотезой формирования повторяющихся популяционных пачек спонтанной активности в нейронных сетях *in vitro*. Наблюдаемый переход от одного установившегося паттерна активации к другому коррелирует со стрессорным воздействием на культуру в процессе смены питательной среды.

Литература

1. *Raichman N., Ben-Jacob E.* Identifying repeating motifs in the activation of synchronized bursts in cultured neuronal networks // J. Neurosci. Methods. 2008. V. 170, № 1. P. 96–110.

2. *Shahaf G., Eytan D., Gal A., Kermany E., Lyakhov V., Zrenner C., Marom S.* Order-based representation in random networks of cortical neurons // PLoS Comput. Biol. 2008. V. 4, № 11. P. e1000228.

3. *Kermany E., Gal A., Lyakhov V., Meir R., Marom S., Eytan D.* Tradeoffs and Constraints on Neural Representation in Networks of Cortical Neurons // J. Neurosci. 2010. V. 30, № 28. P. 9588–9596.

4. *Xydas D., Downes J.H., Spencer M.C., Hammond M.W., Nasuto S.J., Whalley B.J., Becerra V.M., Warwick K.* Revealing ensemble state transition patterns in multi-electrode neuronal recordings using hidden Markov models // IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 2011. V. 19, № 4. P. 345–355.

5. *Pimashkin A., Kastalskiy I., Simonov A., Koryagina E., Mukhina I., Kazantsev V.* Spiking signatures of spontaneous activity bursts in hippocampal cultures // Front. Comput. Neurosci. 2011. V. 5. P. 46.

6. *Лебедев Р.Д., Бурцев М.С.* Кластеризация пачек спонтанной активности нейрональной культуры // Нейроинформатика-2010 : в 2 ч. 2010. Ч. 1. С. 296–303.

7. *Shahaf G., Marom S.* Learning in Networks of Cortical Neurons // J. Neurosci. 2001. V. 21, № 22. P. 8782–8788.

8. *Le Feber J., Stegenga J., Rutten W.L.C.* The Effect of Slow Electrical Stimuli to Achieve Learning in Cultured Networks of Rat Cortical Neurons // PLoS ONE. 2010. V. 5, № 1. P. e8871.

9. *Marom S., Shahaf G.* Development, learning and memory in large random networks of cortical neurons: lessons beyond anatomy // Quart. Rev. Biophysics. 2002. V. 35, № 01. P. 63–87.

10. *Li Y., Zhou W., Li X., Zeng S., Luo Q.* Dynamics of learning in cultured neuronal networks with antagonists of glutamate receptors // Biophys J. 2007. V. 93, № 12. P. 4151–4158.

11. *Stegenga J., Le Feber J., Marani E., Rutten W.L.C.* The Effect of Learning on Bursting // Biomed. Engineer., IEEE Transactions on. 2009. V. 56, № 4. P. 1220–1227.

Исследование динамики конвективных ячеек в атмосфере Земли по независимым критериям анализа радиолокационного изображения

Е.С. Соколова[1], А.А. Тельных[2], Н.С. Беллюстин[3]

[1]Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники
[2]Институт прикладной физики, Нижний Новгород
[3]Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород

В настоящее время быстро расширяется круг искусственных когнитивных систем, которые обучаются по наблюдательным и экспериментальным данным и после этого функционируют «сознательно» в том отношении, что они формируют модельные представления о фрагментах окружающего мира и применяют их для прогнозирования и управления. Если до недавних пор подобная «когнитивная» деятельность была более характерна для естественных систем, развившихся в процессе наземной эволюции (высшие животные и человек), то в последний период все более возрастает роль искусственных интеллектуальных систем, решающих различные прикладные задачи. В настоящем исследовании обсуждаются аспекты формирования такой системы для погодных динамических процессов в атмосфере Земли, которые пока плохо поддаются не только управлению, но и прогнозированию. Современные климатические условия на Земле вызывают появление в атмосфере систем мощной кучево-дождевой облачности, как в тропиках, так и в средних широтах, которые принято относить к мезомасшабным системам (МС). Они могут сопровождаться сильным ветром, градом, грозой, выпадением значительного количества осадков и в итоге приводить к негативным явлениям в сельском хозяйстве, разрушению зданий и человеческим жертвам. Все это делает разработку соответствующей когнитивной системы чрезвычайно актуальной. На первом этапе она должна улучшить прогнозирование погоды, а затем обеспечить направленное воздействие на погодные процессы для минимизации возможного ущерба и/или для получения полезных результатов от природных явлений.

Известно, что МС состоят из множества конвективных ячеек, которые представляют собой достаточно сложную динамическую систему. При этом время жизни конвективной ячейки, как правило, около 30 мин. В течение этого времени ячейка зарождается, развивается, достигает зрелого возраста и распадается (умирает). При определенных условиях развития конвективных потоков цикл жизни ячейки может изменяться: она может распасться, или слиться с другой ячейкой, или же на стадии своего угасания возродить новую ячейку. Наиболее яркие и опасные явления происходят во время распада конвективной ячейки. Обычно этот максимальный выброс энергии проявляется в виде осадков, града, грозовых разрядов. Для предсказания места и времени возникновения и дальнейшего развития МС в короткий промежуток времени используется мезомасштабный прогноз (англоязычный термин «nowcasting») [1].

Для этого используются наземные наблюдательные метеорологические пункты и орбитальные метеоспутники. Наиболее подходящими и оперативными инструментам для слежения за эволюцией и движением МС оказались метеорологические радиолокаторы, которые работают на длинах волн 3, 5 и 10 см и позволяют получать обновленную информацию о системах осадков каждые 4–6 минут. Полученная информация отображается в виде изображений профилей по высоте радиолокационной отражаемости, доплеровской скорости воздушных потоков и доплеровского спектра. Радиолокационная отражаемость характеризует отражающие свойства единицы объема облачных элементов и выражается в $мм^6/м^3$ или дБZ, другими словами радиолокационная отражаемость характеризует водность облачных полей и соответственно степень опасности МС, которая состоит из облачных полей. Доплеровская скорость и доплеровский спектр – это дополнительные данные о движении и структуре облачных полей. По динамическому изображению радиолокационной отражаемости, доплеровской скорости и доплеровскому спектру можно оценивать степень опасности МС.

В настоящее время опасные явления выявляются в автоматическом режиме: происходит обнаружение ядра конвективной ячейки на определенной высоте с максимальной отражаемостью (например, не менее 45 дБZ), и, используя данные доплеровской скорости, прогнозируют дальнейшее движение облачных полей. Данный алгоритм используется в программном обеспечении TITAN (The Thunderstorm Identification Tracking and Analysis and Nowcasting), который разработан метеорологами США [2].

В России радиолокационная информация об облачных полях сравнивается с данными наземных станций и степень опасности выражается через критерии распознавания опасности явления: величину отражаемости на высоте изотерм 0 и 22 °С, максимальную высоту радиоэха, температуру на поверхности земли, давление [3].

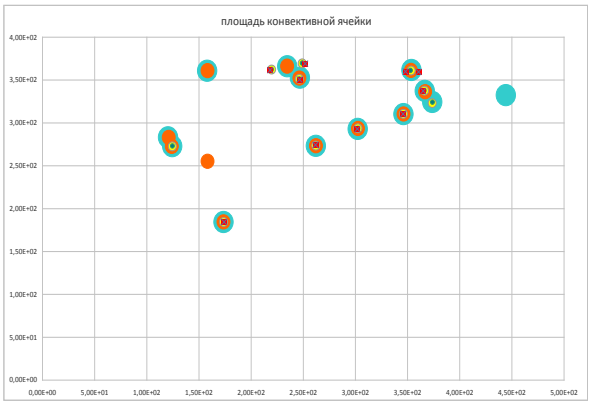
В связи с этим наиболее важным этапом организации интеллектуальной (автоматической) системы слежения за процессами в атмосфере Земли является выбор ключевых признаков, набор кото-

рых позволит с высокой степенью достоверности определить степень опасности МС. Для повышения надежности можно сравнивать радиолокационную информация об облачных полях со спутниковыми данными и с данными наземных станций. Строго говоря, критерии распознавания опасности могут оказаться специфичны для конкретного физико-географического региона и могут потребоваться специальные дополнительные исследования. Однако на первом этапе речь идет о наиболее общих универсальных признаках, которые можно выделить.

Данные обстоятельства стали причиной постановки задачи по выделению общих (независимых) критериев распознавания потенциально опасных МС по двухмерному радиолокационному изображению и по трехмерному распределению радиолокационной отражаемости.

Основная идея состоит в том, чтобы по радиолокационным изображениям отражаемости найти конвективные ячейки с достаточно высоким значением отражаемости (например, не менее 35 дБZ) и определить их признаки: координаты, центр масс, площадь, периметр и ориентацию для каждого угла места. Далее восстановить трехмерный профиль по высоте и определить признаки ячеек (например, объем) на восстановленных изображениях. Затем, используя обучающие алгоритмы (SVM), разработать систему прогноза мезомасштабных систем.

В качестве экспериментальных данных были использованы данные американского доплеровского метеорологического радиолокатора WSR-88D со станции в городе Глазго штат Массачусетс. Эти данные находятся на сервере Национального центра климатических данных США NOAA (http://www.ncdc.noaa.gov/nexradinv/choosesite.jsp. ncdc.noaa.gov/nexradinv/choosesite.jsp) в формате netCDF. Каждый файл содержит информацию по радиолокационной отражаемости, доплеровской скорости и расширению доплеровского спектра по всем азимутальным углам и одиннадцати углам места за время 4 минуты. С помощью программного обеспечения MATLAB был разработан алгоритм восстановления радиолокационного изображения, поиска на нем конвективных ячеек и расчета их площади, периметра, центра масс и объема. При проведении эксперимента были исключены из рассмотрения конвективные ячейки, площадь которых была менее 2 км^2 и расстояние до ближайших ячеек более 10 км.



Результаты проведенного исследования показали, что площадь и периметр конвективных ячеек с увеличением угла места уменьшается, а координаты центра масс у большинства ячеек не изменяются. При этом «слабые» конвективные ячейки достигают меньшей высоты, чем более мощные, и, соответственно, их объем меньше.

Данный алгоритм важен для формирования набора независимых критериев при создании интеллектуальной системы распознавания опасных МС и слежения за состоянием конвективных ячеек в атмосфере.

Литература

1. *Malkomes M.* // Proc. of ERAD. Delft, Netherlands : Copernicus GmbH, 2002. P. 335.

2. *Dixon M., Wiener G.*: TITAN : Thunderstorm identification, racking, analysis and nowcasting : A radar-based methodology // J. Atmos. Oceanic Technol. 1993. V. 10. P. 785–797.

3. *Калинин Н.А.* // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 84.

Хиральный дуализм как системный фактор иерархического структурообразования в биологических системах

В.А. Твердислов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Иерархическая организация биологических систем является структурной основой сопряжения разномасштабных по времени, пространству и функциям процессов в клетках, организмах и сообществах, включая распознающие, управляющие и когнитивные системы. Системным фактором стратификации должен служить хотя бы один параметр порядка, определяющий дискретность смежных уровней, каждый из которых в живых системах сам является сложной системой. Таким инструментом стратификации, начиная с молекулярно-биологического уровня, служит дуалистическое по своей природе явление хиральности, присущее всем основным биологическим компонентам.

Сформулирована синергетическая закономерность, имеющая общий физический, физико-химический и биологический смысл: эволюционирующая система, обладающая запасом свободной энергии и элементами хиральной асимметрии, находясь в пределах одного иерархического уровня, способна в процессе самоорганизации изменять тип симметрии, повышая свою «сложность», но сохраняя знак преобладающей хиральности (D или L). Та же система, проходя точки бифуркации, может проявлять тенденцию к спонтанному формированию последовательности иерархических уровней с чередующимся знаком хиральности заново образующихся структур и с увеличением их относительного масштаба и размерности.

Выявлено закономерное чередование знака хиральности D-L-D-L при переходе на более высокий уровень структурно-функциональной организации ДНК, так же как и смена знака хиральности L-D-L-D при переходе на более высокий уровень структурно-функциональной организации белковых структур. По существу, речь идет о геометризации подходов к механизмам самоорганизации молекулярно-биологических структур в процессах биогенеза и морфогенеза.

Углерод – первооснова хирального дуализма в биосфере. В живых системах иерархичность сопряженных уровней макромолекулярных структур, начинающаяся с «нижнего» асимметричного углерода, служит антиэнтропийным фактором, обеспечивает возможность стереоспецифического комплементарного взаимодействия молекулярно-биологических структур, является структурной основой «выделенных механических» степеней свободы в молекулярных машинах. Выявленная закономерность имеет общий естественно-научный характер и прямое отношение к проблеме происхождения жизни и биологической эволюции.

Рассмотренная система иерархических структурно-функциональных соответствий может иметь прямое отношение к построению интегративных конструкций, сопрягающих рукотворные устройства и мыслящих существ.

Литература

1. *Твердислов В.А.* Хиральность как первичный переключатель иерархических уровней в молекулярно-биологических системах // Биофизика. 2013. Т. 58, № 1. С. 159–164.

2. *Tverdislov V.A.* Chirality as an Instrument of Stratification of Hierarchical Systems in Animate and Inanimate Nature [Электронный ресурс]. URL: arXiv: 1212.1677 [nlin.AO].

Ассоциативная база данных как модель обыденного языкового сознания

Н.В. Уфимцева

Институт языкознания РАН, Москва

Изучение обыденного сознания может рассматриваться, по словам Б.М. Величковского, как одна «из увлекательных, хотя и не всегда бесспорных глав когнитивных исследований» [1. С. 82]. При этом он имел в виду лингвистический и историко-литературоведческий анализ так называемого здравого смысла.

В отечественной психолингвистике (теории речевой деятельности) найден и успешно вот уже более 40 лет используется экспериментальный метод исследования обыденного сознания, сначала в виде исследования внутреннего лексикона (Тверская психолингвистическая школа), а затем, с 90-х годов прошлого века – как исследования языкового сознания (Московская психолингвистическая школа). Все эти исследования ведутся на материале ассоциативных баз данных, полученных методом свободного ассоциативного эксперимента с носителями разных языков.

Пионером в этой области исследований можно считать Дж. Киша, который с группой психологов, работавших в Эдинбургском университете, создал первый ассоциативный тезаурус [2] на материале британского варианта английского языка с целью смоделировать и исследовать структуру внутреннего лексикона и впервые представил эту структуру в виде ассоциативно-вербальной сети (графа). Испытуемыми в трех этапах ассоциативного эксперимента были студенты разных вузов и разных специальностей всех регионов Великобритании.

Принципиально новым в ассоциативной лексикографии стало: 1) проведение ассоциативного эксперимента в три этапа с разным набором стимулов (первая тысяча стимулов была задана исследователями; стимулами для второго и третьего этапов послужили слова-реакции, полученные на первом и втором этапах эксперимента) и с разными группами испытуемых; 2) создание не только прямого ассоциативного словаря (от стимула к реакции), но и обратного (от реакции к стимулу).

В каком-то смысле продолжением и своеобразным развитием исследований Дж. Киша выступает проект «Small World Of Words» (http://www.smallworldofwords.com/new/visualize/) отделения экспериментальной психологии Университета г. Лёвена (Бельгия), начатый в 2003 году, в котором ставится весьма амбициозная цель – построить ассоциативно-вербальную сеть для основных языков мира и выявить различия в содержании самых важных их единиц. К сожалению, ведущие проект психологи сочли несущественным учет родной культуры испытуемых, сосредоточившись только на формальном факторе владения языком (в объеме, достаточном для участия в эксперименте). Здесь мы сталкиваемся с проблемой достаточно типичной для междисциплинарных исследований, когда специалисты в одной научной области вторгаются на территорию другой, но действуют в ней, исходя из методологических и теоретических постулатов своей науки, совершенно не отдавая себе в этом отчет. В данном случае когнитивные психологи в попытках исследовать внутренний лексикон человека и те знания, которые «привязаны» к слову, выходят за пределы своей профессиональной компетенции. Совершенно игнорируется знаковая природа языка, роль культуры в формировании знаний, на которые указывает «тело» знака (слово в звуковой или графической форме). У исследователей отсутствуют знания о том, что такое сознание человека, какое место занимает в нем язык. Как здесь не вспомнить Н.И. Жинкина, с точки зрения которого привычный для человека язык состоит из двух языков: внутреннего, концептуального, на котором осуществляется работа интеллекта, не имеющего отношения ни к какому конкретному этническому языку, и внешнего, формального, предназначенного для общения с другими носителями той же культуры. Их совместное функционирование образует тот феномен, который и называется сознанием [3. С. 141]. Внешний язык формален, поскольку его функцией является установление только правил речи, но не ее содержания. Концептуальность внутреннего языка выражается в том, что «совокупность определенных содержательных компонентов принимается как целое, приобретая специфическое качество целостности» [3. С. 147].

Как показывают наши многочисленные эксперименты, фактор культуры является определяющим для поведения испытуемых в ассоциативном эксперименте, и без его учета получить достоверные экспериментальные данные не представляется возможным. Почему это так? Дело в том, что, как утверждает А.А. Леонтьев, человек «стоит перед лицом не отдельного предмета, а предметного мира как целого; он оперирует не отдельным значением, а системой значений» [4. С. 19]. И эта системность меняется от культуры к культуре и распространяется не только на знания, составляющие картину мира в целом, но и на ее отдельные фрагменты, в нашем случае отдельные ассоциативные поля. Следовательно, обыденное языковое сознание – это и есть система предметных значений, которые могут овнешняться, в том числе и в вербальной форме.

Каким образом мы можем обнаружить эту систему? В Московской психолингвистической школе наиболее оптимальным способом такого овнешнения признан массовый свободный ассоциативный эксперимент. К настоящему времени мы имеем уже четыре базы ассоциативных данных для носителей русского языка начиная с 60-х годов XX века, правда, только для одной социальной группы – студентов. В практике построения Ассоциативного тезауруса было признано существенным то, что получаемые в эксперименте ассоциации в ответах испытуемых обозначаются именно словом национального языка. Представленный в виде многомерной ассоциативной сети, Ассоциативный тезаурус дает представление об устройстве и функционировании обыденного язы-

кового сознания «усредненного» носителя того или иного языка, позволяет по-иному взглянуть на связь языка и культуры и на роль языка в процессе формирования этнического менталитета.

Именно построение по данным Русского ассоциативного словаря [5] ассоциативно-вербальной сети (т.е. неполно связанного, ориентированного графа со взвешенной частотой), позволило впервые построить реальную модель обыденного языкового сознания носителя языка, отвечающую системно-целостному принципу, и исследовать структуру и содержание обыденного языкового сознания.

Этот граф имеет 103 000 разных вершин, т.е. разных слов, которые входят в эту сеть. Количество испытуемых (респондентов), которые «поделились» с нами фрагментами своего языкового сознания, составляет 6600 человек. Это студенты разных специальностей, с родным языком русским, в возрасте от 17 до 25 лет, проживающие в разных регионах Российской Федерации. Эксперимент проводился в конце XX века (см. сайт в Интернете: rat.ivri.webfactional.com/overview/russian/, на котором можно ознакомиться с электронной версией Русского ассоциативного словаря и возможностями его анализа).

Почему полученную таким способом ассоциативно-вербальную сеть можно рассматривать в качестве модели обыденного сознания носителя того или иного языка/культуры?

Во-первых, это модель, описывающая опыт носителя языка как создателя и потребителя текстов и отражающая структуру «разумно-человеческого общения» [6]. По нашему мнению, тем самым она отражает и весь предыдущий речевой и неречевой опыт носителя языка.

Во-вторых, эта модель имеет системно-целостный характер, общий с языковой картиной мира носителя языка, поскольку организована с точки зрения значимости/ценности тех или иных элементов в общей их иерархии. Для анализа этого аспекта модели вводится понятие ядра языкового сознания, в котором выделяется центр ядра и указывается ранг каждого входящего в него элемента.

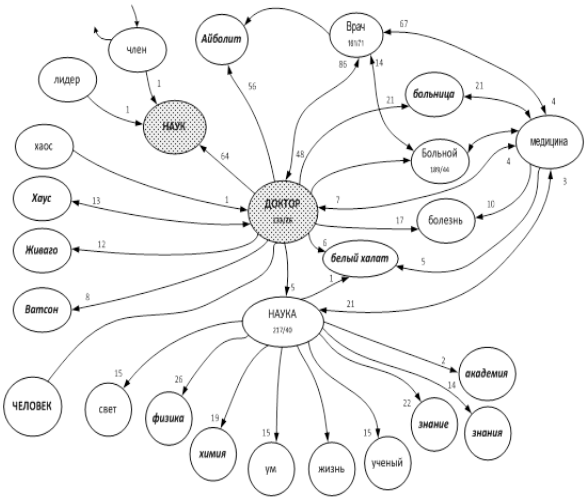
По мнению А.А. Залевской, «максимальное число связей имеют слова, представляющие особое значение для испытуемого как личности. Они являются самыми емкими понятиями, связь с которыми имеет максимальную вероятность воспроизведения, а число слов с максимальной ассоциативной силой составляет не более 2 % от общего объема лексикона» [7. С. 17].

В-третьих, ассоциативно-вербальная сеть строится на материале любого языка при наличии достаточно большого количества данных, полученных в ассоциативных экспериментах.

В-четвертых, ассоциативно-вербальная сеть не строится искусственно, она просто «выводится» из материала, в котором имплицитно содержится, а значит, отражает структуру, объективно присущую языковой картине мира наивного (профанного) носителя языка, культуре как системе сознания, поскольку мир презентирован отдельному человеку через систему предметных значений, как бы «наложенных» на восприятие этого мира. И каждой культуре свойственна своя система организации элементов опыта, которые сами по себе не всегда являются уникальными и повторяются во множестве культур. Уникальной же является именно система организации элементов опыта, т.е. их значимость.

Организующим для такой модели в целом и для каждого ее отдельного фрагмента является принцип значимости Ф. де Соссюра. Каждый элемент ассоциативно-вербальной сети имеет и значение и значимость одновременно. Именно это свидетельствует о том, что он входит в систему, и его значимость (ценность) определяется исходя именно из системы как целого.

На рисунке представлен в виде графа фрагмент ассоциативного поля (АП) стимула ДОКТОР. Как мы видим, в АП выделяются два крупных фрагмента, соответствующих определенным значениям: доктор – 1) врач (медицина), 2) человек, занимающийся наукой, и наука, ее конкретные области и ее атрибуты. Опираясь на указанные частоты слов-реакций, можно определить значимость того или иного значения в пределах ассоциативного поля для носителя языка.



Впервые исследователь имеет возможность реально наблюдать взаимодействие и взаимозависимость значения и значимости как в пределах всей ассоциативно-вербальной сети, так и в рамках отдельного ассоциативного поля и их изменения в зависимости от изменений, происходящих в социуме, и тем самым исследовать реальную структуру и содержание обыденного языкового сознания представителя той или иной культуры.

Исследование выполнено при поддержке грантов РГНФ № 15-34-14007 а (ц), № 15-04-00378а и гранта НШ 5740.2014.6.

Литература

1. *Величковский Б.М.* Когнитивная наука: основы психологии познания. Том 2. М. : ACADEMIA : Смысл, 2006. 431 с.

2. *Kiss G., Armstrong C., Milroy R.* The Associative Thesaurus of English. Edinburg, 1972.

3. *Жинкин Н.И.* Речь как проводник информации. М. : 1982.

4. *Леонтьев А.А.* Слово в речевой деятельности. М., 1965.

5. *Караулов Ю.Н., Сорокин Ю.А., Тарасов Е.Ф., Уфимцева Н.В., Черкасова Г.А.* Русский ассоциативный словарь. Т. 1, 2. М. : АСТ-Астрель, 2002. 782 с., 991 с.

6. *Лосев А.Ф.* Введение в общую теорию языковых моделей. М. : УРСС, 2004. 294 с.

7. *Залевская А.А.* О комплексном подходе к исследованию закономерностей функционирования языкового механизма человека // Психолингвистические исследования в области лексики и фонетики. Калинин : КГУ, 1981. С. 28–44.

Механизмы генерации электрической активности мозга, нелинейные взаимодействия ЭЭГ ритмов и регуляция состояний ЦНС

А.И. Федотчев, А.Т. Бондарь

Институт биофизики клетки РАН, Пущино-на-Оке, Московская область

Одной из центральных проблем современной науки является расшифровка механизмов генерации и закономерностей проявления электрических реакций мозга на внешние и внутренние сигналы в различных условиях его функционирования. В последние годы в связи с крайней актуальностью проблемы интерфейса «мозг – компьютер» этим вопросам уделяется повышенное внимание как отечественных [1–3], так и зарубежных исследователей [4–7]. Однако к настоящему времени совершенно справедливым представляется утверждение, что «чем больше мы продвигаемся в исследованиях анатомической и функциональной архитектоники мозга, тем яснее становится, что принципы его работы совершенно необычны, что мерность его операций выходит за рамки наших представлений» [8].

В наших исходных исследованиях по данной проблеме был применен оригинальный подход, который заключался в динамическом анализе тонкой спектральной структуры ЭЭГ при ритмической фотостимуляции, частота которой плавно изменяется в диапазоне основных ритмов электрической активности мозга (рис. 1).

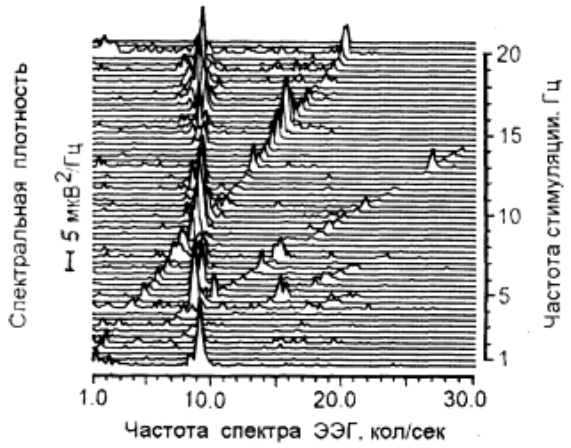


Рис. 1. Выявленные при увеличении частоты фотостимуляции от 1 до 20 Гц дискретные участки индивидуального спектра ЭЭГ, резонансно активирующиеся у данного субъекта при совпадении частоты стимуляции или ее гармоник с их собственной частотой

Полученные данные позволили заключить, что сочетание динамического анализа тонкой спектральной структуры ЭЭГ с динамическими методами стимуляции позволяет выявлять дискретные узкочастотные ЭЭГ-осцилляторы индивида (резонансный портрет), наблюдать динамику их активности при разных видах деятельности и исследовать резонансные свойства ЦНС человека [9, 10].

В дальнейшем нами были исследованы механизмы реакций ЭЭГ человека на специально организованные комплексно-частотные воздействия. Испытуемым одновременно предъявляли две частоты световых ритмических стимулов: постоянной (13 Гц) и непрерывно изменяющейся (от 1 до 6 Гц и обратно до 1 Гц). Эти две частоты предъявлялись либо путем их простого суммирования (аддитивно), либо в виде их произведения (мульти пликативно, амплитудная модуляция постоянной частоты переменной частотой), либо раздельно на правый и левый глаз (см. рис. 2). Проводили сопоставление временных динамик спектров, полученных для предъявляемых сигналов и для разных зон ЭЭГ (см. рис. 3).

На рис. 3 можно видеть, что при всех трех экспериментальных схемах в динамике спектра ЭЭГ обнаружен сходный ромбовидный паттерн резонансной активации, подобный спектральной динамике сигнала в случае его амплитудной модуляции.

Таким образом, комплексно-частотные оптические воздействия, исходно сформированные путем амплитудной модуляции постоянной частоты переменной частотой, воспринимаются нервной системой как амплитудно-модулированные сигналы без искажений или разделения на составляющие частоты и находят адекватное отражение в резонансных реакциях электрической активности мозга. Отмеченные при этом позитивные сдвиги функционального состояния организма объясняются нелинейными взаимодействиями интегративных, резонансных и адаптационных механизмов деятельности мозга при восприятии человеком сложных ритмических сигналов [11, 12].

На основании результатов описанных и дальнейших исследований были сформулированы концепции о механизмах и закономерностях проявления резонансных и адаптационных реакций мозга на ритмические сенсорные воздействия [13], а также о ключевой роли простейшей нелинейной операции – мультипликации – в ритмообразовании, функционировании структур мозга и обеспечении когнитивных функций [14].

В статье представлены литературные и собственные данные о вычислительных свойствах как отдельного нейрона, так и нервных сетей и систем мозга. На уровне нейрона и отдельных нейронных сетей рассматриваются операции, производимые между различными входами в эти системы (gain modulation). Как правило, результатом этих взаимодействий является их мультипликация. На системном уровне рассматриваются операции, производимые нервной системой с ритмами, наблюдаемыми в электрической активности. Анализ нелинейных явлений при их взаимодействии демонстрирует их мультипликативный характер.

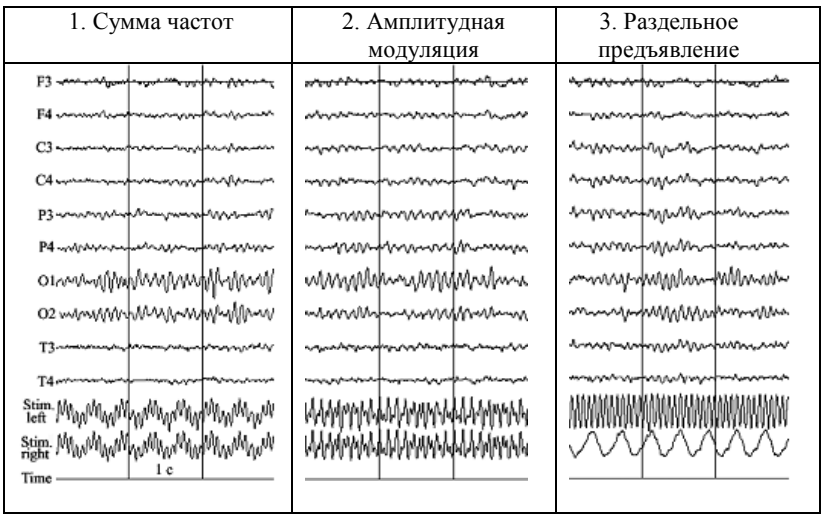


Рис. 2. Фрагменты многоканальной записи ЭЭГ при трех типах светового воздействия. F3, F4 – левая и правая лобные зоны; C3, C4 – центральные; P3, P4 – теменные; O1, O2 – затылочные; T3, T4 – височные зоны

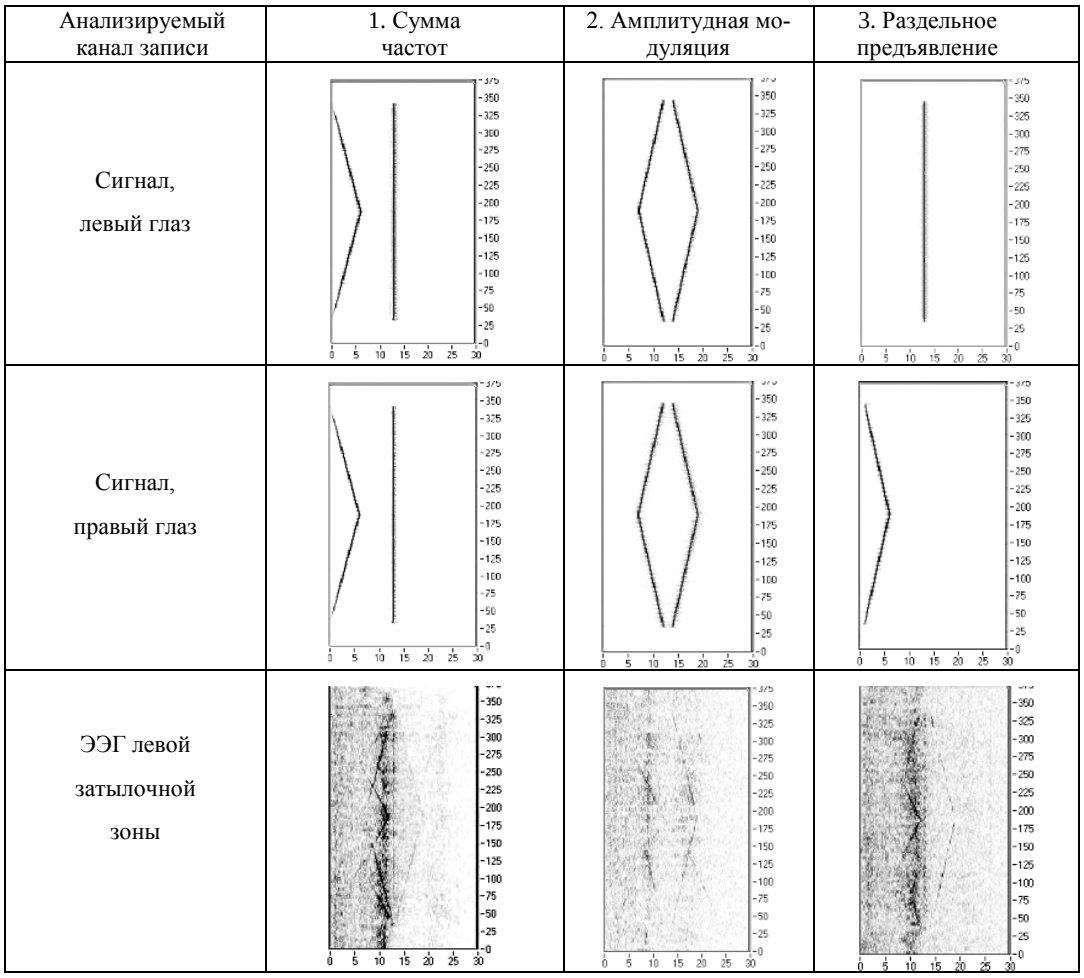


Рис. 3. Динамики спектров, полученных при обработке сигналов и ЭЭГ левой затылочной зоны для трех типов светового воздействия. По оси абсцисс – частота спектра, Гц: по оси ординат – время эксперимента, с; ось *Z* – спектральная плотность, отраженная в интенсивности окраски

Выдвигается гипотеза о формировании линейки ритмов мозга на основе каскада операций с исходным низкочастотным ритмом (проторитмом). В качестве механизма рассматривается рекурентная мультипликация процессов в системах с обратными связями. Нарушение этого процесса может приводить к формированию таких патологических явлений, как эпилептиформная активность.

В настоящее время в развитие данных концепций совместно с Нижегородским госуниверситетом изучается роль нелинейных процессов в

межсистемных взаимодействиях. Исследуются механизмы синхронизации и взаимосвязи между ритмическими процессами в ЭЭГ, деятельности сердца, дыхательной и двигательной систем. Сформулированные теоретические положения, выявленные закономерности и разработанные методологические подходы легли в основу нескольких направлений прикладных исследований.

1. *Регуляция состояний ЦНС человека методом резонансного нейробиоуправления с двойной обратной связью от ЭЭГ-осцилляторов индивида.*

В данной технологии узкочастотные ЭЭГ-осцилляторы, характерные для каждого пациента и выявляемые у него в реальном времени, одновременно используются в двух независимых контурах обратной связи от ЭЭГ-осцилляторов пациента. В первом, традиционном, контуре биоуправления компьютер выделяет доминирующий у данного пациента узкочастотный ЭЭГ-осциллятор из тета-диапазона ЭЭГ (4–8 Гц) и генерирует на его основе звуковые сигналы обратной связи, подаваемые пациенту через наушники и служащие ему ориентиром для подавления этих компонентов собственной ЭЭГ. Второй контур является дополнительным контуром ритмической стимуляции, осуществляемой с помощью фотостимуляционных очков. Параметры фотостимуляции автоматически настраиваются компьютером на частоту доминирующего у пациента узкочастотного ЭЭГ-осциллятора из альфа-диапазона ЭЭГ (8–13 Гц) с целью его резонансной активации.

К настоящему времени разработана методология применения данной технологии для коррекции неблагоприятных функциональных состояний человека [15], подавления стресс-индуцированных расстройств [16] и лечения синдрома дефицита внимания с гиперактивностью [17], а также для активизации познавательной деятельности и процессов обучения у человека [18].

2. *Коррекция психогенных функциональных расстройств музыкальными воздействиями, управляемыми ЭЭГ-осцилляторами пациента.*

Данный подход сочетает преимущество неосознаваемого восприятия музыки с предельной индивидуальностью нейробиоуправления с обратной связью от ЭЭГ-осцилляторов субъекта. Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что эффективность нейробиоуправления при коррекции неблагоприятных функциональных состояний существенно повышается, если в качестве сигнала обратной связи от биопотенциалов мозга используется музыка или музыкоподобные воздействия [19–22].

3. *Исследование механизмов работы мозга в крайних состояниях как основа для разработки новых подходов в терапии эпилепсии.*

Данный проект выполняется совместно с ИТЭБ РАН и направлен на изучение одной из важнейших проблем нейрофизиологии и медицины – выяснение механизмов функционирования мозга в крайних состояниях, таких как чрезмерное возбуждение и гиперсинхронизация, характерных для эпилептической судорожной активности. Работа проводится на модели височной эпилепсии на морских свинках. Для этого у животных вызывается острая судорожная активность (эпилептический статус), которая в дальнейшем приводит к хроническим нарушениям – эпилептогенезу. На всех стадиях экспериментов: в норме у здоровых животных, во время эпилептического статуса и последующего эпилептогенеза – применяются определенные типы фотостимуляции, осуществляемой во время записи электрической активности лимбических структур мозга. Впервые количественно анализируются резонансные свойства медиальной септальной области, гиппокампа, энторинальной коры и амигдалы при фотостимуляции во время эпилептического статуса и эпилептогенеза. Данное исследование не только внесет вклад в понимание механизмов функционирования лимбических структур мозга при судорожной активности как крайней степени активации мозга, но и позволит изучить механизмы формирования такой распространенной формы эпилепсии, как фоточувствительная. Кроме того, количественная оценка параметров фотоиндуцированных электрических реакций в мозге позволит определять фазу эпилептогенеза, а также объективно оценить эффективность противосудорожной терапии.

Литература

1. *Фролов А.А., Бирюкова Е.В., Бобров П.Д. и др.* Принципы нейрореабилитации, основанные на использовании интерфейса «мозг – компьютер» и биологически адекватного управления экзоскелетоном // Физиология человека. 2013. Т. 39, № 2. С. 99–113.

2. *Каплан А.Я., Кочетова А.Г., Шишкин С.Л. и др.* Экспериментально-теоретические основания и практические реализации технологии «интерфейс мозг – компьютер» // Бюллетень сибирской медицины. 2013. Т. 12, № 2. С. 21–29.

3. *Bazanova O.M., Vernon D.* Interpreting EEG alpha activity // Neurosci. Biobehav. Rev. 2014. V. 44. P. 94–110.

4. *Seitz A.R.* Cognitive neuroscience: targeting neuroplasticity with neural decoding and biofeedback // Curr. Biol. 2013. V. 23, № 5. P. R210–R212.

5. *Huster R.J., Mokom Z.N., Enriquez-Geppert S., Herrmann C.S.* Brain-computer interfaces for EEG neurofeedback: Peculiarities and solutions // Int. J. Psychophysiol. 2014. V. 91, № 1. P. 36–45.

6. *Khanna A., Pascual-Leone A., Michel C.M., Farzan F.* Microstates in resting-state EEG: current status and future directions // Neurosci. Biobehav. Rev. 2015. V. 49. P. 105–113.

7. *Herrmann C.S., Strüber D., Helfrich R.F., Engel A.K.* EEG oscillations: From correlation to causality // Int. J. Psychophysiol. 2015. Feb 4. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2015.02.003.

8. *Каплан А.Я.* Гармония большого взрыва // Отечественные записки. 2014. № 2(59). С. 123–136.

9. *Федотчев А.И.* Анализ резонансных ЭЭГ реакций при оценке эффективности сенсорных воздействий // Физиология человека. 1997. Т. 23, № 4. С. 117–123.

10. *Salansky N., Fedotchev A., Bondar A.* Responses of the nervous system to low frequency stimulation and EEG rhythms: clinical implications // Neurosci. Biobehav. Rev. 1998. V. 22, № 3. P. 395–409.

11. *Бондарь А.Т., Ларионова А.В., Пивоварова О.В., Федотчев А.И.* О реакциях нервной системы человека на комплексно-частотные световые воздействия // Биофизика. 2004. Т. 49, № 5. С. 928–932.

12. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Ларионова А.В., Пивоварова О.В.* Информационно-вычислительные технологии в познании механизмов деятельности мозга: как нервная система реагирует на поличастотную стимуляцию? // Биомедицинская химия. 2004. Т. 50. Прил. № 1. С. 188–194.

13. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Семёнов В.С.* Нелекарственная коррекция функциональных расстройств у человека. Принцип двойной обратной связи от ЭЭГ-осцилляторов пациента. Saarbrucken : LAP Lamberts Academic Publishing, 2010. 87 с.

14. *Бондарь А.Т., Федотчев А.И., Шубина Л.В.* Нелинейные взаимодействия в ЦНС // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях : сборник трудов конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2013. С. 16–19.

15. *Fedotchev A.I., Bondar A.T. et al.* Biofeedback training and bioelectric control from patient's endogenous rhythms in non-drug correction of human functional disturbances // Int. J. Psychophysiol. 2008. V. 69, № 3. P. 164–165.

16. *Федотчев А.И.* Стресс, его последствия для человека и современные нелекарственные подходы к их устранению // Успехи физиол. наук. 2009. Т. 40, № 1. С. 102–115.

17. *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. 2015 [в печати].

18. *Земляная А.А., Федотчева Т.А., Федотчев А.И.* Современные подходы к активизации познавательной деятельности человека // Успехи физиол. наук. 2010. Т. 41, № 4. С. 45–62.

19. *Федотчев А.И., Радченко Г.С.* Музыкальная терапия и музыка мозга: состояние, проблемы и перспективы исследований // Успехи физиол. наук. 2013. Т. 44, № 4. С. 34–48.

20. *Федотчев А.И., О, Сан Чжун, Семикин Г.И.* Сочетание технологии ЭЭГ биоуправления с музыкальной терапией для эффективной коррекции стресс-вызванных расстройств // Современные технологии в медицине. 2014. Т. 6, № 3. С. 60–63.

21. *Radchenko G.S., Parin S.B., Polevaya S.A., Korsakova-Kreyn M.N., Fedotchev A.I.* EEG correlates of perception of tonal modulation in musical fragments // Int. J. Psychophysiol. 2014. V. 94, № 2. P. 192.

22. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Бахчина А.В., Парин С.Б., Полевая С.А., Радченко Г.С.* Музыкально-акустические воздействия, управляемые биопотенциалами мозга, в коррекции неблагоприятных функциональных состояний // Успехи физиологических наук. 2015 [в печати].

Теория функциональных систем П.К. Анохина с позиций нелинейной динамики и теории самоорганизующегося хаоса

М.А. Филатов, Д.Ю. Филатова, В.В. Григоренко, Д.А. Сидоренко

Сургутский государственный университет

Проблема формализации (математизации) теории функциональных систем организма (ФСО) человека остается открытой [1]. Наш анализ более 1 миллиона выборок параметров регуляторных динамических биосистем (20 тысяч испытуемых), которые можно относить к функциональным системам организма человека, показывает ограниченные возможности использования статистики в описании их (ФСО) якобы стационарных режимов (СР). В различных наших публикациях (http: www.cmp.esroe.ru) представлены доказательства возможности описания сложных биосистем (на примере функциональных систем организма человека) с позиций оценки хаотической динамики самоорганизующихся сложных биосистем [2–5].

В настоящей статье на примере двух функциональных систем (нервно-мышечной системы – НМС и кардиореспираторной системы – КРС) демонстрируются ограничения стохастического подхода в их описании. Одновременно доказывается, что тремор, теппинг и кардиоинтервалы не могут быть представлены моделями детерминированного хаоса Арнольда – Тома. Однако статистические методы в виде расчета матриц парных сравнений выборок все-таки можно использовать для описания сложных систем третьего типа, к которым относится мозг человека (нейросети), НМС, КРС и многие другие управляющие и регуляторные системы организма, которые обеспечивают гомеостаз. В целом, сейчас все сложные биосистемы (complexity) следует рассматривать как особые системы третьего типа – СТТ [2–5].

1. Постановка проблемы

В 30-е годы XX века человечество очень близко подошло к пониманию особой динамики поведения сложных биосистем, которые позже (в 50–60-е годы) будут обозначены или как complexity, или как синергетические системы. Работами У.Б. Кеннона (см. «The Wisdom of the Body», 1932) и серией работ П.К. Анохина по гомеостазу функциональных систем организма было обозначено вхождение медико-биологических наук в особую неопределенность, непредсказуемость и неповторяемость сложных биосистем – complexity (сейчас мы их обозначаем как системы третьего типа – СТТ). За прошедшие более 70 лет с момента публикаций работ Анохина и Кеннона все-таки не удалось приблизить медицину и биологию (да и естествознание в целом) к познанию всей сложности СТТ, сущности этих систем – complexity [1–5].

Многочисленные попытки описания динамики поведения вектора состояния (таких) систем (ВСС) в виде $x = x(t) = (x_1, x_2, \ldots, x_m)^T$ в фазовом пространстве состояний (ФПС) наталкиваются на ряд принципиальных противоречий, которые долгие годы просто или игнорировались, или даже не упоминались вообще. Объяснение такой ситуации обусловлено очень сложной динамикой поведения ВСС в ФПС, которая последние 40 лет обычно представлялась как детерминированный хаос. Подчеркнем, что попытки описания параметров гомеостаза и, в частности, ФСО (которые тоже обеспечивают гомеостаз) с позиций стохастики или детерминированного хаоса наталкиваются на серьезные трудности [2–4].

Последнее связано (как мы это доказываем сейчас) с непрерывным хаотическим изменением функций распределения $f_j(x)$ всех наблюдаемых у одного испытуемого (подряд) j-х выборок (j-й номер выборки), которые получаются при повторных измерениях параметров ФСО человека (биосистемы), находящейся в якобы неизменных состояниях (т.е. в гомеостазе). Если объект находится в гомеостазе, а выборки его x_i непрерывно изменяются, то как описывать такие сложные системы с позиций стохастики или хаоса Арнольда – Тома? Тем более что для СТТ мы не можем повторить начальные параметры $x(t_0)$ вектора состояния системы $x = x(t) = (x_1, x_2, \ldots, x_m)^T$.

Одновременно и все признаки детерминированного хаоса тоже не имеют места. В частности, начальные параметры ВСС в виде $x(t_0)$ невозможно повторить, автокорреляционные функции $A(t)$ не сходятся к нулю (при возрастании t), нет выполнения свойства перемешивания (меры не инвариантны) и константы Ляпунова непрерывно изменяют знак. Нет доказательств того, что СТТ демонстрируют детерминированный хаос, хотя для СТТ будущее действительно не зависит от прошлого, и в этом проявляется сходство СТТ с объектами и системами Лоренца – Арнольда [3–5].

На сегодня в естествознании действительно отсутствуют доказательства того, что СТТ (complexity) не могут быть описаны статистическими функциями распределения $f(x)$ или моделями в виде детерминированного хаоса. Три нобелевских лауреата (I.R. Prigogine, J.A. Wheeler, M. Gell-Mann) в своих работах неоднократно пытались представить СТТ как объект теории хаоса (в интерпретации Лоренца, Арнольда – Тома). Однако любая модель в виде дифференциальных уравнений потребует повторения $x(t_0)$ и равномерного распределения на выходе системы. Однако для СТТ меры не инвариантны! При этом СТТ принципиально не могут продемонстрировать модельные свойства детерминированного хаоса, а модели СТТ в виде дифференциальных уравнений

не могут устойчиво показать детерминированный хаос при постоянном изменении начальных параметров сложной биосистемы [2–5].

Таким образом, особые СТТ не могут являться объектом детерминистского или стохастического подходов (ДСП), и они требуют разработки новых подходов и теории. Одно из таких новых направлений представляется в рамках создаваемой сейчас теории хаоса-самоорганизации (ТХС). При этом мы вынуждены говорить скорее о самоорганизующемся хаосе, чем о хаосе-самоорганизации. Эти два процесса работают не как отдельные механизмы, а в комплексе, в рамках единого механизма регуляции гомеостаза и ФСО. Если цель ФСО – это устойчивость биосистемы (гомеостаз), то возникают в рамках ТХС вопросы к самой этой устойчивости. Что понимать под устойчивостью ФСО с позиций детерминистско-стохастической науки (ДСН) и ТХС?

2. Устойчивость СТТ, или Где самоорганизация в хаосе СТТ?

Сразу отметим, что мы можем говорить об организации (или самоорганизации), если хотя бы выборки будут демонстрировать некоторые неравномерные распределения. В этом случае мы используем понятие флуктуации около средних значений x (или медиан) и можно говорить о наличии силы (потоков, механизмов регуляции), которые создают эту неоднородность (в распределении). Именно такой подход мы имеем в статистике, когда внешние или внутренние силы пытаются вывести систему из устойчивого состояния. Здесь устойчивость подразумевается в аспекте неизменности $x_i(t)$, т.е., например, получения $g \approx 9{,}8$. Каждый раз результат приближается к g_0, но флуктуирует в целом вокруг этого g_0. Флуктуация внешних возмущений или флуктуация внутренних механизмов регуляции порождает некоторое статистическое среднее $<g>$ и статистический разброс вокруг этого значения. Для СТТ это невозможно!

Вся физика (до момента появления хаоса Лоренца) изучала в основном именно эти процессы. Мы имели некоторое среднее $<x>$ величины отклонений (сигмы – σ) или имели непараметрические распределения для x, но они всегда были устойчивы на некотором интервале времени Т (пока шли измерения). Вся детерминистская и стохастическая наука, включая и детерминированный хаос (там только устойчиво мы имеем равномерное распределение – mixing property, когда меры инвариантны), базируется на устойчивости (повторяемости) начальных условий (т.е. повторении $x(t_0)$) и некотором повторении (хотя бы в виде функций распределения $f(x)$) конечных параметров процесса или системы в виде $x(t_k)$. Это характерно для физических, технических или химических систем. Для ФСО это невозможно из-за их постоянного хаоса и непрерывно работающих механизмов самоорганизации [2–5].

С живыми системами (а также социальными, политическими, экономическими, с системой морали и нравственности) ситуация в корне отличается. В живых системах мы можем иметь неравномерное распределение в конце процесса, но эти функции $f(x)$, описывающие распределение $x(t_k)$ в конце T, не могут демонстрировать устойчивость. Сами $f(x)$ начинают хаотически изменяться, и мы можем получать какие-то распределения самих этих функций распределения (их числовых характеристик, их параметров). Получается хаотическое распределение самих этих функций $f(x)$. В этом случае мы не можем говорить о стохастике ($f(x)$ непрерывно изменяется!), не можем говорить о равномерном распределении (нет детерминированного хаоса), и тогда мы говорим о CTT-complexity. Это системы особого, третьего, типа с самоорганизующимся хаосом, которые пытался обозначить I.R. Prigogine вместе с M. Gell-Mann, J.A. Wheeler и другими учеными в виде детерминированного хаоса [3, 5].

Для СТТ характерна неравномерная самоорганизация, которая «мерцает» и пытается организовать неравномерные распределения, но хаос (в смысле Арнольда – Тома) не будет достигнут. Мы будем иметь непрерывный (хаотический) калейдоскоп функций распределения $f_j(x)$ для каждой j-й выборки на всем T, но иногда пары выборок будут совпадать (т.е. мы их можем отнести к одной генеральной совокупности). Поскольку $x(t_0)$ невозможно произвольно повторить (как и $f_j(x)$), то СТТ – не объект ДСН, и для них требуются другие модели и методы исследования. Оказывается, что с позиций стохастики имеются некоторые закономерности в динамике поведения параметров квазиаттракторов (КА), которые характеризуют различные выборки одного объекта (испытуемого), находящегося в гомеостазе, или группы испытуемых, гомеостаз которых приблизительно одинаков [2–4].

В этой статистической одинаковости КА и заключена цель любой ФСО (по П.К. Анохину), и одновременно заключен смысл гомеостаза организма человека. Параметры КА могут изменяться под действием внешних факторов среды, внутренних перестроек (например, с возрастом) или при заболевании. Тогда меняются цели ФСО, гомеостаза и стратегии регуляции всех компонент вектора состояния организма человека $x(t)$. В этом случае мы говорим о реакции ФСО на внешний стимул (если изменения краткосрочные), об адаптации (в экологии человека) или о заболевании (в медицине).

Для всех таких процессов при изменении КА мы можем говорить об эволюции организма, его ФСО, его гомеостаза. Эта эволюция отлична от эволюции Пригожина – Гленсдорфа, и она не описывается термодинамикой неравновесных систем I.R. Prigogine. Эволюция СТТ имеет другой смысл и описание на основе анализа параметров КА, их движения в фазовом пространстве состояний [2–5].

Таблица 1

Матрица парного сравнения миограмм одного и того же человека при слабом напряжении (p = 5 даН), представляющая критерии Вилкоксона p
(критерий значимости p < 0,05, число совпадений k = 6)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,85**	0,00	0,00	0,02	0,00	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	0,00
3	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
4	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
5	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
6	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
7	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
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	**0,39**	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	**0,06**	0,01	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	**0,10**	0,00	**0,31**
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00		0,00	0,00	0,01	0,00
12	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00		0,00	0,01	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,10	0,00	0,00		0,00	**0,08**
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00		0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,08	0,00	

В целом, мы для ФСО не можем использовать термины «флуктуации», «детерминированный хаос», понятия термодинамики. Например, энтропия биосистемы может не изменяться (при этом ФСО и гомеостаз существенно изменяются) и наоборот. Термодинамические и статистические критерии стационарности нарушены. ФСО находятся в стационарных состояниях (гомеостазе), когда статистические характеристики (функции распределения $f(x)$) изменяются, и наоборот, ФСО изменяются, когда статистические функции существенно не изменяются. Для иллюстрации этих парадоксов получены конкретные примеры из более чем 1 миллиона изученных выборок x_i и их функций распределения $f(x)$, но это все легко проверяемо любым исследователем [2–5].

3. Нестационарная стационарность или стационарная нестационарность

Многократно подчеркивалось в ДСН, что стационарный режим – это или dx/dt = 0, или сохранение вида $f_j(x)$ при переходе от j к j + 1 и т.д. для биосистемы, якобы находящейся в стационарных условиях (гомеостазе). Представим один из десятков тысяч примеров «нестационарной» стационарности.

Употребляя слово «нестационарный», мы будем говорить о состояниях ФСО, когда в выборках $x(t)$ мы наблюдаем постоянные изменения, например $f(x)$, но реально система находится в гомеостазе (она стационарна). Сразу отметим, что все СТТ демонстрируют особое такое состояние, когда их функции распределения непрерывно изменяются, а параметры КА (статистически) не изменяются. Это представлено в табл. 1, где число совпадений выборок миограмм k = 6. Такое мы обозначаем как неопределенность 2-го типа. В целом, сейчас мы говорим об определенностях 1-го и 2-го типа как характеристиках гомеостаза и СТТ в целом. Почти все выборки разные – для кардиоинтервалов, миограмм, ЭЭГ, тремора и теппинга, биохимических параметров крови [2–5].

4. Механизмы самоорганизации СТТ

Любая динамика ФСО демонстрирует отклонение от принципов и устойчивости Пригожина (когда dE/dt = min const), и принципов эволюции Пригожина – Гленсдорфа, когда $dP \leq 0$ (при $P = dE/dt$). Последнее означает, что для линейных (дается аппроксимация и на нелинейные) систем всякое возмущение стационарного состояния всегда сопровождается ростом (возрастанием) производства энтропии E. В наших примерах это должно сопровождаться тем, что усиление отклонения СТТ от равновесия должно увеличивать производство энтропии p. В действительности для СТТ мы почти не имеем примеров такого поведения E [2–5].

Вместе с тем при усилении возмущающего воздействия (переход от спокойного состояния к возмущенному) мы почти всегда наблюдаем усиление стохастичности СТТ, т.е. нарастание упорядоченности в СТТ. Это проявляется в увеличении числа k «совпадений» пар выборок при построении матриц парных сравнений компонент $x(t)$. Например, в табл. 1 мы наблюдаем k = 6 одинаковых пар выборок миограмм при силе напряжения мышцы F_1 = 5 даН.

При переходе к F_2 = 10 даН количество k = 20, т.е. увеличивалось более чем в 3 раза. Однако при этом энтропия E практически не изменилась (табл. 2). Параметры квазиаттракторов в двухмерных и трехмерных ФПС различаются кратно (см. табл. 3 – в 65 раз, и табл. 4 – в 158 раз). Таким образом, теория ТНС Пригожина для СТТ не эффективна, и мы проводим для complexity расчет матриц парных сравнений выборок и одновременно расчет параметров S и V , т.е. для их квазиаттракторов. И k, и S (или V) изменяются существенно и являются мерой отхода СТТ от положения покоя (равновесия).

Таблица 2

Значение *E* (энтропии Шеннона)
одного и того же человека при слабом (5 даН)
и сильном (*p* = 10 даН) напряжении мышцы
(уровень значимости по критерию Вилкоксона *p* = 0,94)

	E при 5 даН	*E* при 10 даН
1	2,304	3,546
2	3,584	3,641
3	3,039	3,246
4	3,641	3,546
5	3,446	3,309
6	3,684	3,509
7	3,546	3,522
8	3,684	3,546
9	3,684	3,546
10	3,746	3,322
11	3,484	3,746
12	3,022	3,584
13	3,541	3,584
14	3,584	3,346
15	3,784	3,204
среднее	3,452	3,480

Таблица 3

Значения *S* миограмм одного и того же человека
при слабом (*p* = 5 даН) и сильном (*p* = 10 даН)
напряжении мышц
(уровень значимости по критерию Вилкоксона *p* < 0,01)

	S, 5 даН	*S*, 10 даН
1	33109	165923
2	66402	67596
3	87770	130086
4	61866	164369
5	61644	204732
6	34176	234639
7	64701	213759
8	52395	196652
9	63339	256338
10	64629	247324
11	97944	230112
12	51948	226460
13	49813	232078
14	53192	219700
15	51666	238854
среднее	59640	201908

Таблица 4

Значения *V* миограмм одного и того же человека
при слабом (*p* = 5 даН) и сильном (*p* = 10 даН)
напряжении мышц
(уровень значимости по критерию Вилкоксона *p* < 0,01)

	V, 5 даН	*V*, 10 даН
1	1854104	39489674
2	4515336	4528932
3	7635990	12097998
4	3526362	16601269
5	3883572	25386768
6	1879680	33084099
7	4140864	26078598
8	3038910	25368108
9	4243713	50242248
10	4653288	44518320
11	6170472	35667360
12	3116880	42348020
13	3138219	51521316
14	3297904	35152000
15	2944962	32484144
среднее	3869350	31637924

Литература

1. *Анохин П.К.* Кибернетика функциональных систем. М. : Медицина, 1998. 285 с.

2. *Еськов В.М., Назин А.Г., Русак С.Н., Филатова О.Е., Хадарцева К.А.* Системный анализ и синтез влияния динамики климато-экологических факторов на заболеваемость населения Севера РФ // Вестник новых медицинских технологий. 2008. Т. 15, № 1. С. 26–29.

3. *Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В.* Кинематика биосистем как эволюция: стационарные режимы и скорость движения сложных систем – complexity // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2015. № 2. С. 62–73.

4. *Eskov V.M., Eskov V.V., Braginskii M.Ya., Pashnin A.S.* Determination of the degree of synergism of the human cardiorespiratory system under conditions of physical effort // Measurement Techniques (Medical and Biological Measurements). 2011. V. 54, № 7. P. 832–837.

5. *Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Zimin M.I.* Uncertainty in quantum mechanics and biophisics of complex systems // Moskow University Physics Bulletin. 2014. V. 5. P. 41–46.

Моделирование динамики параметров памяти человека в норме и при патологии

М.А. Филатов, Т.Ю. Поскина, Д.А. Сидоренко, Т.В. Стрельцова

Сургутский государственный университет

Состояние мнемических функций человека, проживающего в условиях Югры, является весьма важной проблемой психофизиологии и биофизики сложных систем – complexity. Это направление связано, в первую очередь, с теоретическим пониманием различий и одновременно общности в изучении сложных функций организма человека (complexity). На сегодняшний день исследования роли психофизиологических механизмов адаптации человека, базирующихся на мнемических процессах, не очень многочисленны. В этой связи нами разрабатываются новые методы исследования показателей памяти в условиях выявленной психофизиологической патологии на основе моделей потери информации и нового подхода в аспекте поведения параметров complexity – с помощью расчета квазиаттракторов. Последнее представляет особый интерес для диссипативных структур и теории хаоса.

1. Постановка проблемы

Большой интерес в методологическом и экспериментально-клиническом аспекте представляют разработка и внедрение новых диагностических способов и устройств для выявления доклинических нарушений физиологических функций организма и внедрение таких новых методов диагностики в клинику для более объективного, экспрессного обследования больных с психосоматической, неврологической патологией.

Исследованию нарушений памяти у больных хроническим алкоголизмом посвящено большое количество работ, и это изучение насчитывает не один десяток лет, при этом используются различные методики. Отмечается, что в состоянии абстиненции наиболее выраженные нарушения памяти связаны с колебаниями внимания, утомляемостью, истощаемостью.

Продолжительное воздействие на организм человека (при хронических интоксикациях) различных ядовитых веществ, в частности алкоголя, не только ведет к выраженным морфологическим изменениям в органах и системах, но и приводит к значительным качественным отклонениям в их функционировании с изменением психофизиологических показателей, часто с развитием психопатологических симптомов и синдромов с выраженными изменениями личности [5]. В материалах различных экспериментальных исследований [4, 6] показано, что при алкогольной интоксикации в головном мозгу возникают два типа изменений – обратимые и необратимые. Последние характерны для длительной алкоголизации, при них возникают очаги ганглиозноклеточных выпадений в коре, деструкции в белом веществе полушарий большого мозга, мозолистом теле, аммоновой формации, амигдалярном комплексе и других образованиях. При хронической алкогольной интоксикации (алкоголизм I–III ст.), наркомании и токсикомании развиваются выраженные изменения личности с развитием определенных симптомокомплексов [1, 6]. При этом характерны резкая истощаемость нервной системы и неспособность к концентрации внимания. Снижение памяти касается в первую очередь вновь приобретаемых сведений, позднее – долговременной памяти. В тяжелых случаях речь идет об алкогольной деменции и деградации личности.

В настоящей статье представлены данные, полученные при исследовании больных алкоголизмом в первые дни отмены алкоголя. Анализ этих данных показал сложность дефекта нарушения памяти, обусловленный смешанным характером проявлений особенностей патологии мнемических функций [5, 6]. В подобных исследованиях использовали методику с анализом запоминания 10 слов с непосредственным и отсроченным их воспроизведением больными алкоголизмом. Результаты показали, что у большинства больных (72 %) и после лечения наблюдалась небольшая относительная разница между отсроченным воспроизведением и непосредственным, с некоторым сужением объема непосредственно воспроизводимого материала, т.е. по-прежнему оставался нарушенным динамический аспект мнестической деятельности, что, как отмечалось, наблюдается при поражении правого полушария [6].

Кроме того, в исследованиях [6] памяти у больных алкоголизмом показано, что наряду с формально сохраняемой структурой воспроизведения страдает содержание в памяти репрезентируемых образов, понятий. Следовательно, имеется нарушение когнитивного компонента памяти, того самого элемента мнестической деятельности, который существует между стимулом и ответной реакцией и без которого невозможно представить кодирование, хранение, переработку и извлечение в нужный момент хранящейся в памяти информации. При таких отчетливых нарушениях на семантическом уровне, однако, у больных алкоголизмом неоднократное повторение стимульного материала гетерогенной направленности способствует закреплению в кратковременной памяти предложенного ряда слов.

В настоящем исследовании по оригинальным методикам проводилось изучение психофизиологических показателей, в частности параметров памяти, в аспекте их связи с психопатологическими параметрами при алкогольной интоксикации для двух групп населения ХМАО-Югры. Одна

группа – это лица, поступившие в клинику с хронической алкогольной интоксикацией (ХАИ). Вторая группа – относительно здоровые жители г. Сургута. Изучение проводилось в сравнении двух групп.

Методика исследования параметров памяти заключалась в оценке способности пациента запоминать в течение 1 минуты 20 простых слов, которые демонстрировались ему на мониторе персонального компьютера. После этого записывались слова, которые пациенту удалось вспомнить в произвольном порядке. Процесс исследования происходил с 6 итерациями. Перед всеми испытуемыми ставились одинаковые условия проведения тестирования.

2. Модели процессов запоминания

Для построения использовались модели в виде дифференциальных уравнений (Ду) и модели в виде квазиаттракторов [2, 3]. Для моделей в виде Ду оценивался ряд показателей. В качестве представленных параметров выступали:

a_1, a_2, a_6 ($Y1$, $Y2$, $Y6$) – коэффициенты потери информации (после 1-го, 2-го и 6-го раза предъявления информации соответственно);

$a_0(B_0)$ – константа, которая входит в уравнение, описывающее изменение констант a после n итераций (повторов): $a = a_0e^{-kn}$. Такая функциональная зависимость следует из уравнения $a(n + 1) = a(n) - k{\cdot}a(n){\cdot}d(n)$, которое решается на ЭВМ (точка пересечения экспоненциальной кривой с осью Y – осью ранжирования коэффициента потери информации a). Это уравнение эквивалентно дифференциальному уравнению потери информации, которое составлялось из представлений экспоненциальной потери информации (по закону $\exp(-at)$);

$k(B_1)$ – константа (коэффициент) реверберации из дифференциального уравнения $da/dn = -ka$, вычисляемая по методу наименьших квадратов по точкам a_1, ..., a_6 из аппроксимации разностного уравнения (метод Эйлера) вида $a(n+1) = a(n) - k{\cdot}a(n){\cdot}d(n)$. Оба дифференциальных уравнения (для a и для n) составляют основу нашей модели. Программа ЭВМ учитывала Z – погрешность построения экспоненциальной кривой (выбирает экспериментатор).

Программа исследований заканчивалась построением графиков (тестовых мнемических кривых) и расчетом их параметров с занесением в специальный файл. В подсчетах результатов использовался критерий Стьюдента с доверительной вероятностью $p = 0{,}95$.

3. Результаты исследований

В таблицах 1 и 2 приведены полученные усредненные статистические данные исследования. Как было сказано выше, само исследование было связано с применением оригинальной методики, позволяющей давать качественную оценку мнемических способностей испытуемых на основании результатов, полученных при вычислении коэффициентов потери информации a и коэффициентов реверберации памяти k. Очевидно, что все пять параметров модели из табл. 1 существенно отличаются от таковых для контрольной группы обследуемых. В частности, базовый параметр $k = -0{,}1$ для больных (с интоксикацией) существенно меньше, чем $k_2 = -0{,}44$ для контрольной группы. Особенно наглядно это видно из графиков (см. рис. 1 и 2).

На рис. 1 и 2 представлены характерные (наиболее часто встречающиеся) зависимости распределения потери коэффициента информации a от числа повторов n одинаковой информации в контрольной группе и у больных с ХАИ. Кроме того, на рисунках показано их экспоненциальное приближение, рассчитываемое по методу наименьших квадратов, которое осуществляется в автоматическом режиме с помощью ЭВМ.

Таблица 1

Статистические показатели обследуемых с хронической алкогольной интоксикацией (ХАИ) по тесту «Память»

Показатель	Тест «Память»				
	a_1	a_2	a_6	a_0	k
$\langle x\rangle$	0,78	0,67	0,51	0,84	–0,10
D	0,006	0,012	0,041	0,014	0,010
σ_x	0,08	0,11	0,20	0,119	0,100
$\sigma_{\langle x\rangle}$	0,015	0,021	0,029	0,023	0,019
ДИ	0,75; 0,81	0,63; 0,72	0,43; 0,59	0,79; 0,89	–0,14; –0,06
Δx	0,03	0,05	0,08	0,047	0,039

Таблица 2

Статистические показатели контрольной группы обследуемых по тесту «Память»

Показатель	Тест «Память»				
	a_1	a_2	a_6	a_0	k
$\langle x\rangle$	0,58	0,345	0,07	0,87	–0,44
D	0,028	0,03	0,003	0,213	0,019
σ_x	0,167	0,18	0,05	0,463	0,136
$\sigma_{\langle x\rangle}$	0,031	0,033	0,009	0,086	0,025
ДИ	0,51; 0,64	0,28; 0,41	0,05; 0,09	0,69; 1,05	–0,49; –0,39
Δx	0,06	0,07	0,02	0,18	0,05

Примечание: $\langle x\rangle$ – среднее арифметическое, D – статистическая дисперсия, σ_x – среднее квадратическое отклонение, $\sigma_{\langle x\rangle}$ – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического, ДИ – доверительный интервал, Δx – погрешность измерений.

Из рисунков 1 и 2 видно, что даже после 6-го раза предъявления одинаковой простой (сравнительно небольшого объема) информации у боль-

ных с ХАИ коэффициент потери информации *a* остается достаточно большим (0,51) по сравнению с контрольной группой (0,07). Это свидетельствует о сниженной способности к запоминанию у больных с ХАИ по сравнению со здоровой группой испытуемых, а сама величина *a* и параметр *k* могут служить количественными признаками для оценки степени заболеваемости (при поражении ЦНС) при хронической интоксикации. Сейчас эти модели внедряются в клинические исследования.

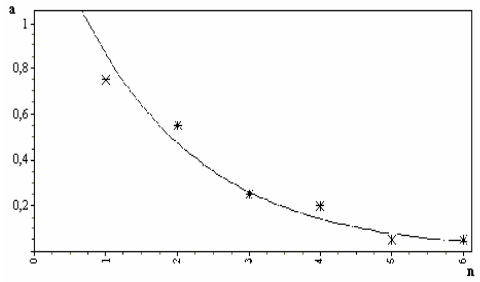


Рис. 1. Зависимость коэффициента потери информации *a* от количества повторов *n* одинаковой информации (20 слов) и их экспоненциальное приближение в контрольной группе (наиболее часто встречающаяся зависимость). Здесь $k = -0{,}28$

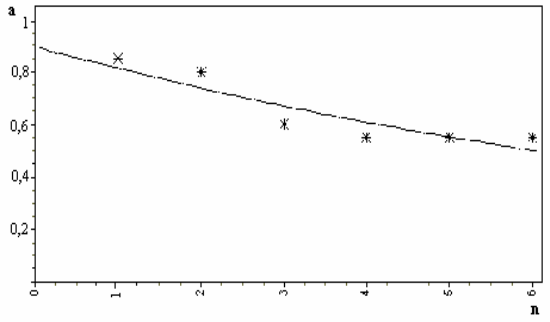


Рис. 2. Зависимость коэффициента потери информации *a* от количества повторов *n* одинаковой информации (20 слов) и их экспоненциальное приближение у больных с ХАИ (наиболее часто встречающаяся зависимость). Здесь $k = -0{,}01$

Из полученных данных следует, что показатели памяти (*a* и *k*) значительно лучше у контрольной (здоровой) группы. Данные по коэффициенту *a* показывают долю забытых слов. Даже после нескольких итераций у лиц, злоупотребляющих алкоголем, показатель *a* остается высоким. При сравнении динамики изменения коэффициентов от a_1 до a_6 мы видим более низкие его значения в контрольной группе, а также более резкое его изменение, что влияет на изменение коэффициента *k*, который характеризует качество памяти. Коэффициент *k* принимает более низкие значения у пациентов с ХАИ. Чем выше данный показатель, тем лучшими способностями к запоминанию, сохранению и аккумулированию полученной информации обладает человек. Одновременно такие модели характеризовались низкой утомляемостью и более высокой способностью к концентрации внимания, что особенно важно в условиях северного производства в Югре.

Разработанные методики позволяют дифференцировать мнемические функции у здоровых людей и людей с психофизиологической патологией, в частности с ХАИ. Полученные результаты подтверждают и дополняют данные других исследователей о неблагоприятном воздействии алкоголя на организм человека, в частности на ЦНС. Такой подход можно использовать для оценки мнемических функций людей разного возраста, пола и других отличий, при этом можно создавать точные количественные оценки возможностей запоминания, которые целесообразно учитывать при оценке качества жизни у человека трудоспособного возраста, проживающего на Севере РФ. Фактически, мы представили пример количественной оценки важного компонента когнитивных функций – памяти.

Литература

1. *Дроздов Э.С., Зенченко Е.И.* Алкоголь: личность и здоровье. М. : Медицина, 1986. 156 с.

2. *Еськов В.М., Рузанкина Н.А., Безяева И.В.* Системный анализ с использованием ЭВМ состояния памяти человека в условиях Северного региона РФ // Вестник новых медицинских технологий. 2002. Т. 9, № 3. С. 31–33.

3. *Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Филатов М.А.* Complexity – особый тип биомедицинских и социальных систем // Вестник новых медицинских технологий. 2013. Т. 20, № 1. С. 17–22.

4. *Кривицкая Г.Н., Гельфанд В.Б., Попова Э.Н.* Деструктивные и репаративные процессы при очаговых поражениях головного мозга. М. : Медицина, 1980. 216 с.

5. *Литвинцев С.В., Колчев С.А., Ершов Б.Б.* Нейрокогнитивные нарушения у больных шизофренией в сочетании с синдромом зависимости от алкоголя // Психиатрия. 2012. Т. 22, № 1. С. 28–32.

6. *Лукачер Г.Я., Махова Т.А.* Неврологические проявления алкоголизма. М. : Медицина, 1989. 272 с.

Искусство как сверхсложная система

А.Н. Фортунатов, Н.М. Фортунатов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Мы часто не принимаем во внимание главную трудность в истолковании искусства. А именно то, что искусство есть переживание, эмоциональная стихия, вводимая художником в сжатые рамки своего произведения. И если существуют сложные (скажем, биологические) системы, то эта система сверхсложная, потому что связана с человеком.

Если же более подробно развернуть эту мысль, то нужно сказать так: искусство есть передача чувства, пережитого художником, и в определенных знаках – в красках, в движении, в видимых пропорциях, в звуках, в образах, выраженных словами (это как раз наш случай, литература), – обращенного к воспринимающему сознанию. То, что бывает недоступным и непонятным для него, оставаясь в логических категориях, становится понятным и доступным, когда переходит в область чувства, «заражая» людей этими чувствами. Такова концепция искусства, изложенная Л.Н. Толстым в трактате «Что такое искусство?» [1. С. 357].

Причем интерпретация этого свойства, которое и делает искусство искусством, в абсолютно равной мере тяжела как для гуманитариев, так и для представителей точных наук. Первые ограничиваются нередко исследованием языка, хотя очевидно, что выражение чувства в художественном произведении – система *надъязыковая* по своей природе и никакой иной быть не может, или увлекаются предметностью изображения и пускаются в бесконечные свободные рассуждения *по поводу* литературы, оставляя в стороне саму литературу, т.е. конкретную художественную ткань, которая непосредственно воспринимается читателем.

Другие в той же мере оказываются далеки от цели, хотя связаны по рукам и ногам прямой противоположностью первым – безупречной точностью эксперимента и отсутствием каких бы то ни было вольных импровизаций. Скажем, работа сердечной мышцы в тончайших нюансах фиксируется хорошо настроенным аппаратом, передавая ритм и всплески эмоциональных состояний испытуемого во время чтения. Но эта картина, как бы ни была она точна, ни в какой мере не может отразить духовно-душевных движений сознания, скорее всего лишь физиологические их следствия.

Здесь нужны параллельные усилия. Сейчас же и те и другие пытаются сосчитать то, что не поддается счету – эмоционально-образные, эмоционально-художественные импульсы, обращенные к человеку, и его реакцию на них. Пересказать в словах идею произведения искусства (по терминологии Достоевского, «идеи-чувства» [2]; в определении Толстого – «образы чувства» [1. С. 74]) невозможно. Они будут разрушены. Однако можно с достаточной точностью рассмотреть структурный план их выражения, т.е. определенную организацию частей и целого в структуре произведения, в которой и может быть только высказанной художественная мысль, если она действительно художественно высказана. Односторонний подход к такого рода явлениям искусства неизбежно будет обречен на неудачу.

Например, то, что гуманитариями воспринимается как нечто загадочное, едва ли не мистическое, получает точное обоснование в математических подходах. Так, одна из неожиданных закономерностей, отмеченных В. Г. Яхно: живая система принимает решение раньше, чем приходит сигнал. Эта идея способна объяснить некоторые особенности творческого процесса Пушкина и одновременно законченные результаты его труда – гениального цикла «Повестей Белкина», остающегося камнем преткновения для истолкователей, начиная с момента появления его в виде публикации. Это сжатая, компактная структура, состоящая из пяти небольших новелл. Каждая если не в ладонь величиной, как Чехов весело определял для себя идеал краткости, то, во всяком случае, в несколько страниц, не больше. Причем количественный момент сохраняет жесткую норму, а именно – 9 страниц. Исключение составляют только две новеллы: «Гробовщик» – 5 и «Барышня-крестьянка» – 14 (все те же 9 и 5) страниц.

В истории создания цикла тоже есть свои загадки и свои тайны. Он прошел две стадии. Первая – хронологический порядок появления текстов, вторая – их компоновка в цикл.

В момент создания новелл, а все они возникли в одно и то же время, в Болдинскую осень 1830 года, обращает на себя внимание некоторая странность: равные промежутки времени между появлявшимися из-под руки автора один за другим текстами – 6 дней. Зафиксировать их оказалось возможным благодаря совершенной случайности: Пушкин имел обыкновение отмечать в рукописи с точностью до одного дня, иногда, впрочем, и часы шли в дело, завершение того или иного своего замысла. Так возникло противоречие, никем не замеченное: беспокойный, напряженный, нервный ритм труда – и размеренные отрезки времени (тоже своеобразный ритм, но спокойный, уравновешенный) между отдельными произведениями. Пушкин продемонстрировал в Болдинскую осень поистине моцартовский эффект творческого порыва: не то удивительно, что за короткое время написаны такие гениальные вещи, а что так много написано гениальных вещей, не хватило бы, кажется, времени, чтобы только переписать их, а ведь черновики его, мы знаем, стоили ему адских усилий.

Этот ритм труда был как будто заранее запрограммирован, когда он только еще начинал рабо-

ту, и продиктован поэту какой-то не зависимой от него высшей силой, и он следовал этому зову. Сознательного расчета здесь не было.

Другая такая же загадка возникает при анализе процесса моделирования автором структуры отдельных новелл и цикла в целом. Появление «Повестей Белкина» в хронологической последовательности таково: «Гробовщик» / «Станционный смотритель» / «Барышня-крестьянка» / «Выстрел» / «Метель». Но первые две вещи и две последние – это не просто новеллы, следующие одна за другой в процессе их создания, а нерасторжимые структуры-двуединства. Он так и будет пользоваться ими, не нарушая их внутренних связей. Печатая цикл, автор откроет его «Выстрелом» – «Метелью», а затем последует другая связка «Гробовщик» – «Станционный смотритель». Иными словами говоря, он работал замкнутыми в себе художественными единствами-блоками. Он не мог предполагать, начиная писать первую новеллу будущего цикла («Гробовщик»), что случится именно такое структурное построение. Но ведь случилось же. Не мог знать, потому что не руководствовался заранее обдуманным намерением, что возникнет еще один такой же блок из двух новелл, как «Гробовщик» и «Станционный смотритель», и повторит вновь предыдущую структуру («Выстрел» – «Метель»), притом спустя некоторое время после вторгшейся и расчленившей творческий процесс «Барышни-крестьянки». Но он делает именно то, что надо делать и что соотнесется с общей постройкой цикла, которая в этот момент не существовала в его сознании хотя бы только как идея, как набросок будущей соразмерной, гармоничной целостности. Живая система несет в себе то, что разум бессилен схватить, заранее выстраивая будущий шедевр законченной, строгой целостности цикла и отдельных его элементов.

Это доказывают прямые факты работы Пушкина, притом совершенно бесспорные. Закончив в Большом Болдине все пять новелл, он, предварительно переписав их набело, сшил все в небольшую тетрадь. Но вот наступает новая стадия работы над циклом, болдинская тетрадь разброшюрована – и вдруг у нас на глазах словно по волшебству возникает поразительная завершенность частей и целого.

В центре оказался самый краткий текст – «Гробовщик», невольно выделенный среди других новелл, кроме необычного содержания (общение героя с загробным миром), двумя совершенно формальными свойствами: своим объемом (почти вдвое меньше общей нормы для других новелл) и особенностями структуры с использованием обратной симметрии, в то время как во всех других новеллах использовалась последовательная организация.

С двух сторон от «Гробовщика» возникли два крыла цикла: «Выстрел» – «Метель» / «Станционный смотритель» – «Барышня-крестьянка». Причем «Барышня-крестьянка» заранее была запрограммирована такой, что в финале цикла взяла его весь в четкое композиционное кольцо по принципу контраста: в «Выстреле» в центре романтическое лицо в трагической ситуации; в «Барышне-крестьянке» – тоже романтическая коллизия, но решенная в духе веселого водевиля. Однако новелла ко всему прочему объединила в себе два мира, прежде разъединенные. «Выстрел», «Метель» – дворянский круг, привилегированное сословие, нередко лица незаурядные (Сильвио, Бурмин); «Гробовщик» и «Станционный смотритель» – мещанская среда, толпа, «народ». Но в «Барышне-крестьянке» все эти люди вдруг пускаются в общий пестрый хоровод рука об руку, и не разглядишь сразу, где барин, а где его слуга, где барышня, а где дворовая крепостная крестьянка.

Последняя новелла несет в себе, как это очевидно, *синтезирующее* начало. Но ведь она создавалась, когда и в помине не было цикла, а между тем в ней каким-то чудом заранее предугадан его результат, причем такой, какой уже тогда, когда она появилась, выражал идею целого. Воображение Пушкина далеко забегало вперед и предвосхищало то, что выходило из-под его руки. Импульса (цикла) нет, а его составные части и все художественное единство уже существуют.

По-видимому, в дело здесь вступают сложные коммуникативные связи. Реальная жизнь произведения (а не просто факт его наличного бытия) есть момент единения трех составляющих: 1) субъекта, творящего произведение искусства, 2) самого произведения искусства и 3) субъекта воспринимающего. Но если известные постмодернистские интерпретации повторяют упрощенные клише о «смерти автора» как о *следствии* вторжения воспринимающего в художественный текст, то совершенно не исследованной и полной интересных перспектив оказывается прямо противоположная сторона художественного творчества – «преджизнь» произведения, мистическая логика его детерминации и, соответственно, *будущей* обусловленности *адекватного* восприятия данного текста читателем.

Возникнет единство творящего и воспринимающего сознаний, значит, есть произведение искусства, нет, тогда это может быть все, что угодно: или топорная, грубая работа, или какая-то ошибка художника, скажем, не заметившего, что искренность чувства заменила холодная рефлексия, и т.п.

Поэтому к цепи, установленной когда-то гегелевской эстетикой, следует добавить еще одно звено, чтобы система оказалась действительно замкнутой, – то, на чем основано единение автора и читателя, а именно *общий опыт*, жизненный и даже общечеловеческий опыт творца и воспринимающего. Не случайно А. Н. Колмогоров в 1963 году, выступая на первом симпозиуме Комиссии комплексного изучения творчества при АН СССР, говорил, что для того, чтобы создать кибернетическое устройство, способное писать стихи, нужно ввести в него «блок читателей», для чего пришлось бы моделировать едва ли не всю историю культуры. Надо вспомнить, что в эти годы А.Н. Колмогоров сам занимался исследованием

стихотворного размера (метра) с применением нетривиальных методов математического анализа.

Реальный процесс создания и восприятия произведения искусства более сложен и состоит не из трех, а из четырех составляющих; причем связи в них к тому же не линейно однонаправленные, а обратные.

К великому сожалению, стремление привлечь математику к объяснению особенностей литературного произведения со стороны гуманитариев редко заканчивается удачей. В середине 1950-х годов Д. Благой отметил «математическую точность» Пушкина, начав со стихов и закончив «Повестями Белкина». Кроме «Выстрела», делает он свой вывод, «ни одна из остальных четырех «Повестей Белкина» на части не разделена» [3]. Но это искажает общий закон построения *всех без исключения* новелл, так как структура каждой из них состоит как раз из двух частей, да еще построенных всякий раз по матричному принципу: вторая часть повторяет – с вариативными изменениями – структуру первой. Это абсолютный закон в построении отдельных новелл, который дает автору четко структурировать весь цикл.

По всей вероятности, ложный вывод возникает из-за того, что исследователя занимал персонажный план, не совпадающий со структурным, более сложным или, можно сказать точнее: совершенно иным. Вместе с тем этот план предельно условен, и сопоставляемые величины (персонажи) без особенного ущерба для дела могут быть заменены цифрами или буквами.

Семиотические подходы тоже уводят в сторону от структуры. Здесь доминирует отвлеченность, неподвижность, статика, рациональность, но уже в виде знаков. Среди множества примеров можно вспомнить сравнительно недавнюю монографию В. Топорова «Число и текст». Сначала производится тщательный анализ, сколько раз в том или ином художественном произведении используются цифры 1, 2, 3, 4 и т.д. (а также производные фразеологические обороты от них), и в завершение даются некоторые статистические подсчеты [4]. Дело не только в том, что целостность художественной структуры в подобном случае, как и в предыдущем, не принимается во внимание. Исчезает парадокс пушкинской формы, где точность построений возникает благодаря неточности, зыбкости, подвижности составляющих ее элементов; статика (узнаваемость) проявляется в динамике энергичного развития и преображения; тождество – в трансформациях; симметрия сочетается с асимметрией, гармоничность – с дисгармоничностью.

Таким образом, художественное произведение (в пушкинском творчестве это видно особенно отчетливо) начинает восприниматься как некая пра-логическая целостность, которая должна интерпретироваться именно как целостность, а не как набор самостоятельных, пусть и чрезвычайно важных, элементов. Логика дискретного мышления начинает диктовать алгоритм противо- и сопоставления различных элементов целостности, что в глубинном своем основании противоречит художественно-чувственному восприятию литературного образа. Это отнюдь не означает, что данная система должна восприниматься как замкнутая «вещь в себе», чья интерпретация возможна лишь на основе общих и даже отвлеченных рассуждений, которые, упаси Бог, не должны касаться конкретных проявлений художественного гения, «красноречивых частностей» классического текста.

Если воспринимать художественное произведение в категория коммуникативного взаимодействия создающего и воспринимающего сознаний, то возникает обширное поле до сих пор не учитываемых «мета-смыслов», рожденных, во-первых, ожиданиями аудитории в получении ею потенциально важной для нее информации, во-вторых, аксиологией, в-третьих, этикой, в-четвертых, культурно-исторической детерминацией создаваемой автором и читателем общей смысловой парадигмы, которая возникла как бы «до того», как родился текст, но кристаллизовалась только в самый момент его целостного рождения-восприятия. Именно в этом контексте совершенно по-новому начинают звучать классические пушкинские строки «ах, обмануть меня нетрудно, я сам обманываться рад»: аксиология и этика этого небольшого художественного образа основана на радостной готовности идти навстречу эмоционально-чувственному импульсу извне. Не в этом ли состоит и коренная суть всего процесса художественно-творческой коммуникации?

«Мета-смыслы» в данной ситуации являются своеобразными маркерами истинности внелогических, образно-чувственных построений, а также их неслучайности, детерминированности, логического соответствия той эмоционально-образной предзаданности, которая скрыта в художественном произведении.

Литература

1. *Толстой Л.Н.* О литературе. М. : Художественная литература, 1955.

2. *Достоевский Ф.М.* Собрание сочинений : в 10 т. Т. 8. М. : ГИХЛ, 1957. С. 60.

3. *Благой Д.* Мастерство Пушкина. М. : Советский писатель, 1955. С. 239.

4. *Топоров В.* Число и текст [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.gumer.info/bibliotek_Buks/Linguist/topor/chisl_text.php. Дата обращения 8.07.2015.

Концентрированные модели как ресурс реновации гуманитарного знания в современных условиях

В.А. Фортунатова

Институт экономики и предпринимательства ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

Кризис гуманитаристики в его универсально-многообразных формах приобрел глобальный характер и отразился в цепи других, более частных, кризисов – в культуре, экономике, человеке. Это служит импульсом для переосмысления сути, роли, значения и возможностей гуманитарного знания для современности. Отдельные усилия в этом направлении делаются с разных сторон, но не складываются в общую систему представлений об этой проблеме. А.П. Назаретян предпринял успешную, на наш взгляд, попытку рассмотреть цивилизационные кризисы в контексте универсальной истории с позиций синергетики, психологии и прогнозирования [1]. Однако цивилизация и гуманитарное знание всегда находились не в ладах друг с другом, поэтому намеченные здесь выводы остаются в стороне от сущностных исследовательских задач.

Но, с другой стороны, рассчитывать на рождение теории в условиях кризисов тоже не приходится. Существующие схемы, постулаты и принципы, а также культурологические формы и их описания мало что дают для понимания столь двойственного феномена, как культура, отражающего вневременность и моментальность, всеобщность и сугубо частный характер этого уникального явления.

Ныне завершается гуманитарный цикл в создании и объяснении мироустройства, сопровождаемый острой потребностью в обновлении общегуманитарных представлений. В.С. Степин назвал подобное состояние «глобальной революцией, которая может привести к изменению типа научной рациональности» [2].

«Заканчивается не только эпоха Просвещения с его универсалистскими гуманистическими ценностями и западными гуманитарными технологиями, уже породившими проект архаичного фашизма, – вместе с эпохой Просвещения исчезает Модерн, капитализм, сам Библейский толпо-элитарный проект, который был средством управления массами людей в течение двух тысяч лет. Этот проект может быть заменен культурологическим дискурсом личности в цветах цивилизационных ценностей и внутрикультурных коммуникаций», – вторит ему профессор Уральского федерального университета С.Н. Некрасов [3].

Такое состояние отечественного гуманитарного знания не вызывает сходного интереса западных исследователей, где за последние годы с периода расцвета философии постмодернизма не появилось сколько-нибудь заметных теорий и концепций на этот счет. Поэтому проблема гуманитарного обновления сегодня остается открытой, требующей к себе всестороннего внимания. Устойчивое мнение о том, что в человеке объяснить все ресурсами научно-рационального знания невозможно, наделяло и культурологию репутацией философско-практической метафизики, а саму науку объявляло «теорией теории», т. е. лишенной объекта и предмета исследования. Попытки ввести «геометрию в географию» определялись как смехотворные, отдающие дань общественной моде на «физику».

Однако в современной гуманитаристике, заполненной метагностикой, возникла ситуация вытеснения ее субстантивной иррациональности поиском специфических свойств присущей ей рациональности – в виде согласованности ее элементов, эмпирической адекватности современной действительности, способности к выявлению и обогащению ее содержательного потенциала, с которым также оказался связан целый комплекс проблем по выявлению органики гуманитарного продукта, а точнее, культурного пространства, созданного человеком.

Культура появилась из его борьбы с природой и стала означать «вторую природу», искусственный мир, производный от естественного, частью которого остается и сам ее создатель. Его присутствие определяет *живое* состояние культуры, в которой по мере нарастания ее объема стали происходить процессы самомоделирования, т. е. раздробления целостного некогда мира культуры на отдельные самостоятельные сферы, адаптированные к опыту и потребностям человека. Так появились важнейшие универсальные культурные модели – образование, экономика, наука, профессия, человек и др. Их можно отнести к разряду функциональных моделей, обладающих определенными параметрами и направленных на отражение порядка действий и достижение заданных целей.

Эволюционная морфология культурных моделей сопровождалась появлением особых продуктов, так называемых *текстов.* Решающую роль пускового механизма в этом процессе сыграло Слово. Соединенное с идеей, оно оказалось в основе логоцентрической картины мира, создало сакральные, художественные и учебно-утилитарные тексты. Вербализация культуры сопровождала весь путь ее развития до середины XX века. Затем этот процесс замедлился из-за Цифры и порожденных ею механизмов дискретизации, аналого-цифровых преобразований, искусства схемотехники. Исходные принципы текстуализации культуры изменились. Появилось множество других текстов: не Человека, но определенной личности, не образования вообще, но образования в конкретной стране, в контексте определенной идеологии, с учетом значимых социальных факто-

ров. Текстуализация происходит уже не с помощью слов, но с помощью различных знаков, фактов, действий, предметов. Текстообразование, начинаясь в связующем сознании человека, подобном Средиземному морю, повлиявшему на появление феномена Античности, вбирает в себя его обстановку, случайные, на первый взгляд, проявления характера, отдельные реплики, обмолвки, реакции, поступки и т.д.

Появилось даже такое парадоксальное с точки зрения традиционной логики современное понятие, как «текст цифры». Но сходное с ним предощущение было еще у И. Бунина в 1906 году, когда он написал свою новеллистическую повесть «Цифры». Математический знак в новом словесном тексте потребовал своего структурно-смыслового обоснования и особого авторского искусства в его использовании. Тем самым он обрел в ином для себя текстовом пространстве художественную плоть и энергию воздействия. Сходное можно было наблюдать у Зигмунда Фрейда, когда он на гуманитарном материале создавал свое учение, указывающее на прямую взаимозависимость природы и культуры. «Нарциссизм», «Эдипов комплекс» и многие сходные категории его учения имеют очевидный художественный подтекст выражения определенной субъективно-смысловой идеи. Она получила название концепта, и текстуализация уже в начале текущего века стала уступать дорогу концептуализации.

Это означало новое дробление семиотического пространства культуры, поскольку концепт в отличие от идеи акцентирован на субъективной интерпретации того или иного сегмента культурного целого. Множество концептов указывают на дробное состояние многих явлений духовно-психологического происхождения. Потребовалось возвращение к органике культурного текста, т. е. к условиям его появления и принципам существования. Среди условий выделяются три основных: порождения (т.е. реальной действительности), отражения (автор выступает сотворцом реального мира, воспроизводя его своими средствами), воздействия (или восприятия) на Другого. Эти взаимообусловленные фазы-процессы говорят о том, что Текст также относится к живым субстанциям, даже если он составлен из «мертвых вещей». Ведь во всех этих стадиях текстоформирования необходимо участвует человек.

В создании текста используются самые разные знаки, символы, люди, предметы, наделенные символическим значением. Сюда же входят психологические и математические явления, социально-общественные и медийные процессы, играющие роль связующего звена между разнокомпонентной структурой текстовых элементов. Семантика троичности, о которой упоминает В. Топоров в своей работе, посвященной взаимодействиям числа и текста, наполнена человеческими смыслами [4]. Они придают ей вид философемы, или культуремы, пронизанной ментальными основами культурно-бессознательного. Одновременно с этим встает вопрос о философии числа, в которой количественная характеристика объекта отступает перед Numerus – гармонией, так рано осознанной Пифагором и столь необходимой в наши дни.

При этом необходимо признать, что гуманитарный научный дискурс почти всегда имеет характер «контекста оправдания», ибо больше следует за сделанным, увиденным, но не доказанным, ибо в любой момент найденное «доказательство» может изменить свою природу, стать контраргументом по отношению к выстроенной теории. Приблизительность гуманитарного знания является его необходимым и сущностным свойством. Все попытки *назвать* культуру порождают многочисленные образцы антикультуры, не вписывающиеся в очередное определение. Сферы, тексты, концепты в культурном пространстве можно считать моделями самоорганизации и самоосмысления, в которых отражены определенные закономерности бытия и воплощения человеческого духа. Их можно было бы назвать моделями постоянства и воспроизводства, но выделение законов их появления все еще остается неразрешенной задачей.

Предварительный вывод из предыдущих рассуждений состоит в том, что культура, искусство в особенности, обладает внутренней энергией, за счет которой она сама моделирует свою структуру, наполняя ее таким содержанием, которое превосходит реальность в момент ее восприятия, указывая при этом ориентиры на ее прошлый опыт и перспективы будущего саморазвития. Энергия культуры накапливалась по мере увеличения ее тотально-универсального, всепроникающего характера. Отражение конкретного и представление абстрактного идет в ней одновременно и соединяется в образном освоении мира. Гегель говорит о таком проникновении как о «явлении, в котором непосредственно через само внешнее и его индивидуальность мы в неразрывном единстве с ним познаем субстанциальное, а тем самым перед нами оказывается во внутреннем мире представления в качестве одной и той же целостности как понятие предмета, так и его внешнее бытие» [5]. В этом отношении философ видит преимущество образного знания над обычным рассудочным сознанием. Внутреннее и существенное содержание изображения вступает в активное преобразование его в идею за счет энергии человеческого духа, а затем и во внешнее бытие этой идеи, изменяющей реальность, создающей культурное пространство.

Таким образом, культура – это живая, подвижная система, влияющая как на человека, так и на создаваемый им мир. Сила впечатления, осмысления, преобразования, воплощения является различной на всех стадиях своего сохранения, создающей суммативный эффект. Созерцательность и действенность существенно влияют на уровень энергии в окружающем мире, выявляют теургическую мощь человека и определяют эпохи расцвета или угасания культуры.

Вопрос о взаимосвязи человеческого духа и материальной основы явлений, а тем самым и о специфике духовного продукта возникает в истории искусства с периодической регулярностью.

В отечественной гуманитаристике эти темы были предметом обсуждения многих русских философов и художников рубежа XIX–XX веков, так что появление И.А. Бунина в этом контексте не было случайностью. Философско-эстетические идеи В.С. Соловьева включают в себя проблему воздействия искусства. «Художество» он определяет как текущее явление, указывая на эстетику природы как фактор формирования человеческих представлений о прекрасном [6]. Свет сигнализирует о пребывании в природе, звук – о начале внутренних движений, а логос – о рождении мысли (идеи). Уголь и сходный с ним по химическому составу алмаз, превращенный огранкой в бриллиант, передает восприятие мастером рефракцию света, воплощенного в геометрически точных и пропорциональных гранях, а затем возвращающего нас вновь к природе (ср. выражение «бриллиант чистой воды»). Гармоничное пение соловья и раздирающие душу крики мартовского кота также ярко иллюстрируют человеческий отклик на природно-прекрасное. На смену рефракции в алмазе здесь приходит резонанс в виде синхронизации внутренних частот человеческого организма с природной гармонией в виде соловьиного пения.

Природная генетика прекрасного в сознании человека изучена больше на уровне ее психотерапевтического воздействия, но слабо – на уровне теории культуры, хотя сделанные здесь выводы могли бы существенно влиять на социально-общественные процессы. Нельзя не замечать и нарастание обратной тенденции оборачивания прекрасного утилитарным, измерение художественного начала экономическим эквивалентом.

Явление свидетельствует об отделении искусства от природы современного человека, то есть об определенном нарушении синхрогенеза (термин Ю.Н. Караулова) в развитии личности. Антропометрический характер гуманитарных моделей позволяет определить состояние первичной моделирующей системы (ПМС) современника на уровне словообразования, синтаксиса, содержательно-образных представлений [7]. Но следом за ней должна идти вторичная моделирующая система (ВМС), когда на основе памяти и духовного опыта возникают ассоциативно-метафорические модели, рождаются иконические знаки-образы, появляется аксиологическая система символов.

Органика этого уровня между стимулом и реакцией во многом определяется коллективным культурным опытом, управляется отдельными социальными институциями, зависит от образовательно-психологических особенностей индивида.

На практике эти процессы не отражаются линейной динамикой, крайне затруднены в поиске конкретных истоков их появления, а на фоне разбалансирования ПМС и ВМС проступает новая реактивная деятельность личности, ставящая порой в тупик психологов, социологов и других специалистов, не готовых к интерпретации прагматических моделей поведения в виде агрессии и депрессии. Речь идет об эмоциональном факторе творения человека, в последнее время его стали определять «креативностью», подразумевая под этим особое качество творческого начала [8].

Метафоризация как вид смыслового развития в таком значении противостоит обнаженной концептуализации. Когнитивные и образные метафоры сейчас возникают не только на основе сравнения, но и как способ сближения весьма далеких и часто внешне совсем несходных явлений. Все это активизирует мысль, требует выразительной речевой формы, рождает новые гуманитарные смыслы на основе тематической или образной типологии. Метафорический контекст концентрирует в себе большую эмоциональную энергию как на индивидуальном, так и на коллективном уровне.

Концентрация образной силы сосредоточена, прежде всего, в классике, где образный потенциал творца определяется его гениальностью. Однако бывают «заразительные» эпохи, когда гении рождают гениев, когда творящие импульсы охватывают большое число «привлеченных». Сергей Наровчатов как-то заметил, что вклад поэтов-фронтовиков не уступает воздействию Пушкина на мировую поэзию, хотя среди них и не было поэта его уровня.

Время духовного подъема, рождающее поэтов, сопровождается обычно сильными потрясениями, потоком чувств, потребностью в их выражении. Но вот после Освенцима (по наблюдению Т. Адорно) стихи стали другими, ненужными и невозможными. Возникает эпоха эмоциональной притерпелости, душевного бесчувствия, программной антипафосности. Поэзия в XX веке, сыгравшая роль мифа в Античности, перестает быть фактором образного мышления в наши дни.

Развитие техники, снижение речевого потенциала, акцентирование более на зрительном и слуховом, нежели осмысленном и прочувствованном, привело к появлению третьей моделирующей системы (ТМС), которая определила развитие культурно-духовной сферы последних тридцати-сорока лет общественной жизни. Если ПМС была ориентирована на импульсы извне, ВМС – на образотворчество, то ТМС организована на сигналах сознания. Все три моделирующие системы определяют культурную эволюцию человечества вообще и каждого человека в отдельности. Тело, душа и мозг, разумеется, существуют неотделимо от личности, но их акцентное влияние на окружающий мир различно. Если они взаимодействуют между собой, то можно предполагать определенное равновесное состояние человека, которое пока не будем определять гармонией, поскольку механизмы этих взаимодействий еще не изучены. Но когда в этой трехслойной конструкции начинает давать сбой один из уровней, то это сказывается на всей инфраструктуре духовной безопасности человечества.

Симптомы такого сбоя дают о себе знать по самым разным направлениям, вызывают непредсказуемые реакции и последствия. Так в наши

дни, характеризуемые культом логики, разума, практицизма, в трехфазовой структуре личности оказался предельно сокращен срединный слой ВМС, связанный с поэтическим мышлением и восприятием. В такой ситуации путь от импульса (инстинкта) до реакции сознания становится коротким, а действия часто приобретают неосознанный, автоматический характер. Вместе с тем они утрачивают естественный, гуманитарный характер, поскольку исходный семантический материал искусства заложен в его природе и больше всего – в многомерности человеческого мира. «Очеловечивание» человека – это не механический процесс, он происходит благодаря людям, жившим прежде и живущим рядом с индивидом. В этом суть гуманитарного прогресса, которого ряд ученых не признают в качестве такового.

Три моделирующие системы личности порождают различные гуманитарные модусы пропорций в модернизирующемся обществе, которые способны менять объем и силу своего функционального назначения. Изучение этих вопросов имеет практико-антропологическое значение, поскольку выходит на моделирующие возможности всех культурных институтов формирования современного человека.

Литература

1. *Назаретян А.П.* Цивилизационные кризисы в контексте универсальной истории. Синергетика – психология – прогнозирование. М. : Мир, 2004.

2. *Степин В.С.* Теоретическое знание. М. : Прогресс-Традиция, 2000. С. 618.

3. *Некрасов С.Н.* Личность и права человека как центральная проблематика российских перестроек: формирование спасительного культурологического дискурса XXI века [Электронный ресурс]. Режим доступа: pandia.ru>text/78/542/ 28287.php.

4. *Топоров В.* Число и текст [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.gumer.info/bibliotek_Buks/Linguist/topor/chisl_text.php. Дата обращения 8.07.2015.

5. *Гегель Г.Ф.В.* Эстетика : в 4 т. Т. 3. М. : Искусство, 1971. С. 385.

6. *Фортунатова В.А*. Русская философия и культура конца XIX – начала XX века. Н. Новгород : НГПУ, 2008.

7. *Титомир Л.И.* Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца. М. : Наука,1999.

8. Креативность в пространстве традиции и инновации : III Российский культурологический конгресс : тезисы докладов и сообщений. СПб. : Эйдос, 2010. С. 7.

Анализ частотно-временной динамики эпилептических разрядов разного типа с помощью модифицированного преобразования вейвлет

И.В. Хапов[1], И.Г. Комольцев[2], А.В. Габова[3], Г.Д. Кузнецова[3]

[1]Первый московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова
[2]Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва
[3]Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

Эпилепсия является серьезным заболеванием, которое значительно ухудшает качество жизни страдающих им людей. Своевременно и правильно поставленный диагноз, а также верно назначенное лечение во многом определяют течение данной патологии мозга. В настоящее время установлено, что эпилепсия подразделяется на отдельные эпилептические синдромы, имеющие свои особенности. Было разработано несколько классификаций, в основу которых были положены различия характера приступов, степени генерализации патологической активности, прогноза развития, а также влияния одних и тех же фармакологических препаратов на разные формы данной патологии. Значительную роль в дифференциальной диагностике эпилептических синдромов играет клиническая электроэнцефалография (ЭЭГ) – запись электрической активности мозга, которая позволяет уточнить локализацию и примерную частоту патологической активности. По морфологической картине разрядов на ЭЭГ можно сказать о типе эпилептического синдрома. Однако такая классификация основана обычно на качественных оценках, и большое значение имеет разработка и использование методов количественного анализа ЭЭГ. Электрическая активность мозга отражает сложный нелинейный характер работы большого количества нейронов. Для анализа этого нелинейного процесса необходимо использовать адекватные методы математической обработки сигнала.

В данной работе для анализа частотно-временной структуры эпилептических разрядов человека и животных было использовано преобразование вейвлет. Данный метод был модифицирован в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН специально для анализа ЭЭГ [1]. По сравнению с методом Фурье (который дает средние частотные характеристики разрядов), вейвлет-преобразование позволяет с точностью сказать о времени появления той или иной частоты в спектре анализируемого сигнала и оценить частотно-временную структуру разрядов разного типа. Ранее, в работе [2] была описана частотно-временная структура разрядов, встречающихся у пациентов с детской и юношеской абсансной эпилепсией (ДАЭ и ЮАЭ). Примеры такого анализа типичных абсансных разрядов пациента А (ДАЭ) приведены на рис. 1, *а* и *б*. Разряды характеризовались широкой генерализацией по коре и максимальной амплитудой в лобных областях коры. Средняя длительность разрядов была 5–6 с, однако встречались также короткие (до 3 с) разряды (рис. 1, *б*). И в том и в другом случае начальная частота разряда составляла 5–6 Гц. В случае более длинных разрядов частота быстро снижалась до 3–3,5 Гц и поддерживалась на этом уровне до конца разряда. Для наиболее коротких разрядов было характерно стремительное уменьшение частоты на всем их протяжении.

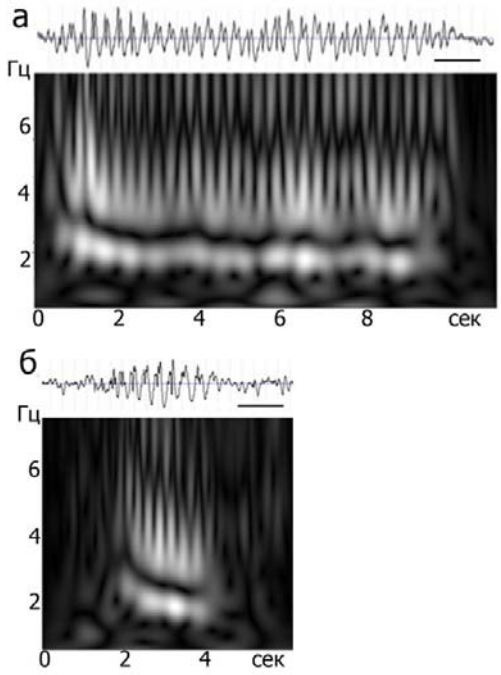


Рис. 1. Типичные разряды пик – волна детской абсансной эпилепсии. Пациент А (6 лет). Запись от правой центральной области коры. Вверху на рисунках – запись разряда пик – волна, внизу – модифицированное вейвлет-преобразование этого разряда, отражающее изменения частоты разряда во времени. По оси абсцисс – время в секундах, по оси ординат – частота в герцах

У животных с генетической абсансной эпилепсией (крысы линии WAG/Rij) общая картина изменений частоты разрядов была такой же, как у пациентов с ДАЭ, однако как начальная, так и средняя частота были выше (соответственно 10–12 Гц и 7–8 Гц). Полученные данные позволили использовать этих крыс в качестве экспериментальной модели для изучения механизмов абсансной эпилепсии [2, 3].

У пациентов известны также другие типы неконвульсивных разрядов, например менее генерализованные по коре, с максимальной амплитудой

в затылочных областях (окципитальная эпилепсия). Такие же окципитальные разряды были найдены у крыс линии WAG/Rij с абсансной эпилепсией [3], т. е. на ЭЭГ могли присутствовать два вида эпилептических разрядов одновременно. С помощью модифицированного преобразования вейвлет было показано, что и у человека, и у животных окципитальные разряды по своей частотно-временной структуре отличаются от типичных абсансных разрядов [2]. На рисунке 2 приведен пример вейвлетного анализа окципитального разряда пациента А. Средняя частота разряда несколько ниже, чем абсансного, а начальная более высокочастотная часть отсутствует. Сходство частотно-временной структуры разрядов у пациентов и у крыс линии WAG/Rij подтвердило, что этих животных можно считать экспериментальной моделью данного типа неконвульсивной эпилепсии.

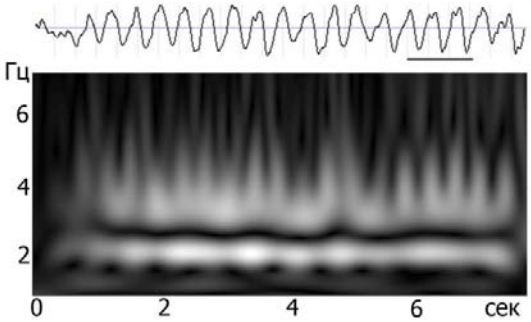


Рис. 2. Окципитальный неконвульсивный разряд, записанный у пациента А. Этот рисунок, как и все последующие, построен так же, как и рисунок 1

Случаи наличия на ЭЭГ одного и того же пациента совершенно различных по морфологии разрядов нередко встречаются в клинической неврологии [4]. Существует также вероятность перехода одного типа разрядов в другой, например при использовании некорректно назначенных противоэпилептических препаратов или нарушении терапевтических доз. Ниже будут приведены несколько подобных случаев, которые встретились нам при регистрации эпилептической активности у пациентов и у животных разных линий.

На рисунке 3 представлен фрагмент записи ЭЭГ пациентки К (клинический диагноз: эпилепсия с атипичными абсансами). Были зарегистрированы два совершенно разных разряда. Они сильно отличаются друг от друга по частоте. Вейвлетные картинки показывают, что ритмическая активность этих разрядов менее упорядочена, чем при типичной абсансной эпилепсии. На ЭЭГ некоторых пациентов могли одновременно присутствовать как типичные абсансные разряды, так и разные формы атипичных разрядов. Для более точной диагностики подобных состояний использование вейвлет-преобразования сигнала ЭЭГ может быть весьма полезным.

В серии экспериментов на крысах линии Wistar (возраст 2–2,5 года, $n = 11$) с хронически вживленными электродами были проведены длительные (2 и более суток) эксперименты с непрерывной записью ЭЭГ. При проведении подробного

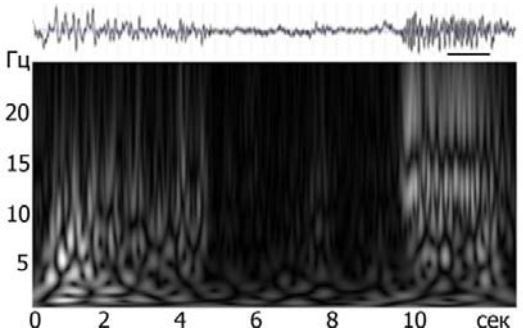


Рис. 3. Атипичные неконвульсивные разряды (пациентка К, 26 лет). Запись от правой теменной области коры

анализа этих записей ЭЭГ и обработки полученных сигналов с помощью вейвлетного преобразования неожиданно были обнаружены эпилептические разряды. Крысы линии Wistar широко используются в нейрофизиологических экспериментах, и в молодом возрасте у них не отмечают эпилептической активности. Однако в случае старых крыс Wistar разряды были зарегистрированы у 8 из 11 животных.

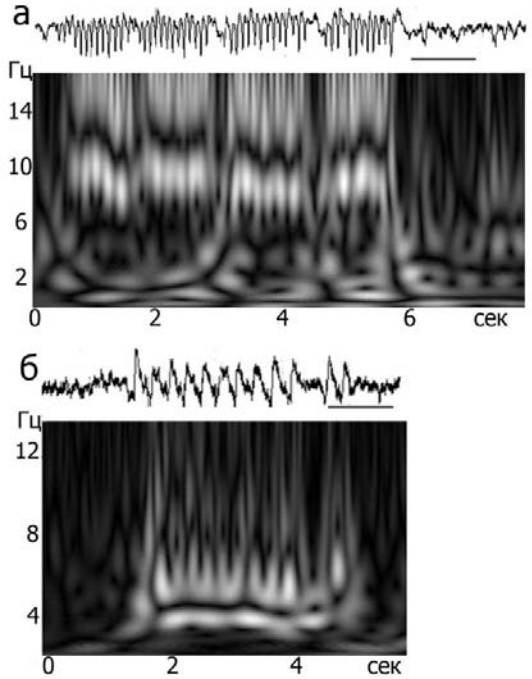


Рис. 4. Два примера эпилептических разрядов, записанных у старой крысы Wistar. На рисунках *а* и *б* представлены записи левой окципитальной области коры

Локализация, степень генерализации по коре и средняя частота разрядов были достаточно разнообразными. У одного и того же животного могли встретиться разряды разного типа (рис. 4, *а* и *б*). Вейвлетный анализ подтвердил различия их частотно-временной структуры. Полученные результаты представляются интересными, потому что из клинической практики известны случаи появления и усиления в пожилом возрасте эпилептической активности, которая отсутствовала у пациентов в молодые годы.

У крыс линии WAG/Rij с целью поиска адекватных противоэпилептических препаратов и ис-

следования нейрофизиологических механизмов абсансной эпилепсии были проведены опыты с введением различных фармакологических средств. В работе [5] исследовали антиэпилептические свойства R(+) WIN 55.212.2 – агониста CB1-рецепторов мозга. Крысам вводили разные дозы препарата и наблюдали частичное или полное подавление типичных пик-волновых разрядов. При использовании больших (12 мг/кг) доз в ряде случаев на ЭЭГ обнаружили появление каких-то новых форм эпилептической активности. Исследование пространственных характеристик этих разрядов показало, что это были разряды лимбической эпилепсии. С помощью вейвлетного анализа были определены частотно-временные особенности таких разрядов в коре и гиппокампе. На рис. 5 приведена запись лимбического разряда гиппокампа и результаты вейвлетного анализа.

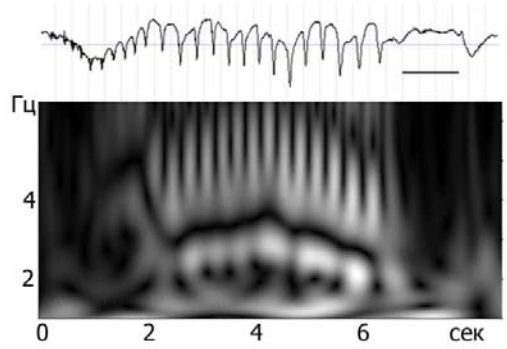


Рис. 5. Разряд лимбического типа, зарегистрированный в гиппокампе у крысы WAG/Rij после системного введения препарата R(+) WIN 55.212.2 (12 мг/кг)

Характерной особенностью эпилептической активности данного типа является довольно высокая начальная частота (5–7 Гц) и очень низкая амплитуда колебаний. Затем частота уменьшается до 3–3,5 Гц, а амплитуда очень сильно увеличивается. Оказалось, что такие особенности частотно-временной динамики не позволяют точно определить начало разряда с помощью используемого варианта преобразования вейвлет. По-видимому, для анализа лимбических разрядов желательно иметь какой-то новый вариант вейвлета.

В данной работе была рассмотрена частотно-временная структура нескольких типов эпилептических разрядов. Подробнее всего были исследованы разряды абсансной эпилепсии [2]. Анализ типичных абсансных разрядов разной длительности позволил предположить несколько возможных механизмов поддержания и окончания эпилептической активности данного типа [6]. Возможность определения с помощью вейвлетного анализа различных типов частотно-временной структуры разрядов делает этот метод полезным в случае присутствия в ЭЭГ нескольких типов эпилептической активности. Данные, полученные при анализе лимбических разрядов, свидетельствуют о том, что при анализе всегда нужно проверять адекватность используемого метода, а в определенных случаях необходимо разрабатывать новые варианты вейвлетного анализа.

Литература

1. *Bosnyakova D., Obukhov Yu*. Extraction of dominant features in biomedical signals // Pattern Recogn. Image Anal. 2005. V. 15. P. 513–515.

2. *Габова А.В., Кузнецова Г.Д., Самотаева И.С. и др*. Одновременное существование двух типов разрядов неконвульсивной эпилепсии у пациентов и у генетической модели абсансной эпилепсии у животных (крысы WAG/Rij) [Электронный ресурс] // Биомедицинский журнал. 2012. Т. 13. С. 291-308. URL: www.medline.ru.

3. *Van Luijtelaar G., Coenen A.* Genetic animal models of absence epilepsy: a review of the WAG/Rij strain of rats // Behav. Genet. 2003. V. 33. P. 635–655.

4. *Зенков Л.Р.* Клиническая эпилептология. М. : МИА, 2010. С. 405.

5. *Van Rijn C.T., Gastani S., Gabova A. et al.* Absence seizure prone genetically epileptic WAG/Rij rats respond to CB1 receptor agonist R(+) WIN 55.212-2 with reduced incidence of spike-and-wave discharges // Epilepsia. 2010. V. 51, № 8. P. 1511–1521.

6. *Bosnyakova D., Kuznetsova G., Gabova et al*. Time frequency analysis of spike-wave discharges using modified wavelet transform // J. Neurosci. Methods. 2006. V. 154. P. 80–88.

Реляционная эпизодическая память в логдинамическом мозге

В.Д. Цукерман, С.В. Кулаков, В.В. Золотухин

Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета, Ростов-на-Дону
vdts@krinc.ru

Введение

Одна из главных загадок современной науки о мозге – способность формировать новую память и обеспечить доступ к ранее сформированной эпизодической памяти – две фундаментальные функции распределенной системы, включающей энторинальную, префронтальную, париетальную и гиппокампальную области мозга. Свободно масштабируемая эпизодическая память – это адаптивный ответ мозга на окружающий нас мир со структурой в многочисленных временных шкалах, которая подразумевает, что не обязательно быть точным; жертвуя точностью в свободно масштабируемой манере можно получить предиктивную информацию из экспоненциально длинных временных шкал.

Активность мозга, наблюдаемая во многих пространственно-временных шкалах, показывает спектр мощности вида $1/f^b$ – функции степенного закона, которая является показателем масштабной инвариантности, предполагающей, что не существует никакой особой шкалы времени или доминирующей частоты активности. Это относится к мембранным потенциалам нейронов, нейронным полевым потенциалам, сигналам неинвазивной электро- (ЭЭГ), магнитоэнцефаллографии (MEG) и функциональной магнитно-резонансной томографии (fMRI) [3]. 1/*f*-подобный спектр мощности показателен для аритмичной активности мозга, не имеющей преимущественного временного масштаба (поэтому свободно масштабируема). Законы масштабирования (скейлинговые законы) повсеместны в природе и, в частности, наблюдались в таких когнитивных феноменах, как восприятие, память, а также в поведенческой активности [4].

Законы масштабирования предполагают существование процессов или структур, которые повторяются в различных масштабах анализа. Хотя переменные, которые выражают закон масштабирования, могут изменяться от одного типа активности к другому, повторяемость законов масштабирования среди многих различных систем говорит о существовании общих принципов организации сложных систем. Свободно масштабируемая характеристическая мозговая активность отличает ее от мозговых осцилляций. Хотя свободно масштабируемая аритмическая активность мозга и узкополосные, ритмические осцилляции мозга в различных диапазонах частот сосуществуют, наше понимание их природы и взаимодействий до сих пор остается крайне ограниченным. Это тем более важно, что свободно масштабируемая активность мозга заметно изменяется в процессах расстройств нормального функционирования (заболеваний) мозга [3]. Наш интерес к проблеме генерации в мозге свободно масштабируемой активности связан с нашими исследованиями эпизодической памяти мозга.

Мозг – сложная динамическая система с операциями в очень широком диапазоне временных шкал от миллисекунд до многих лет. Открытия пространственно-активных клеток гиппокампально-энторинальной системы мозга [5–7], отмеченные Нобелевскими премиями 2014 года, важны, потому что все события нашей жизни происходят в пространственно-временном контексте и сохраняются в эпизодической памяти на протяжении многих лет.

Эпизодическая память была образно определена канадским психологом E. Tulving, как «ментальное путешествие во времени», в котором «субъект перескакивает назад во времени», вспоминая события прошлого [8]. Теперь, когда получены экспериментальные данные [9, 10], ментальное путешествие во времени можно рассматривать в более широком смысле, т.е. как обращение не только к воспоминаниям прошлого, но и к воображению будущего, частным примером которого является планирование предстоящей пространственной навигации. Фундаментальную роль в воспоминаниях (вызове из памяти), формировании предсказаний будущего и планировании предстоящих действий играет обучение последовательному временному порядку событий.

Некоторые важные положения, принятые при моделировании эпизодической памяти

Каковы общие принципы организации эпизодической памяти? Какие требования стоят перед системой эпизодической памяти субъекта? Перечислим наиболее важные из них.

1. *Масштабная инвариантность систем эпизодической памяти.* Реализуется как во временном (свободно масштабируемая динамика), так и в пространственном (фрактальная геометрия) измерениях.

2. *Пространственно-временной контекст эпизодической памяти.* Сохранение в памяти информации, «где» и «когда» событие или последовательность событий имели место.

3. *Самоидентификация организма в окружающем пространстве.* Механизм реализации основан на ансамблях пространственно активных клеток гиппокампально-энторинальной системы мозга («решетчатые» клетки, клетки «направления головы», клетки «места», «граничные» клетки). Своеобразная разметка окружения с помощью клеточных гексагональных решетчатых полей активности разного масштаба и направлений позво-

ляет животным осуществлять самолокализацию в ближнем окружении, построение и запоминание когнитивных карт пространства обитания.

4. *Целенаправленное поведение в окружении.* В основе механизмов навигации в пространстве лежат эгоцентрическая и аллоцентрическая (геоцентрическая) системы интегрирования траектории на основе специфических нейронных ансамблей гиппокампальной, префронтальной и париетальной областей мозга.

5. *Эпизодическая память – многостадийный динамический процесс.* Кодирование событийных последовательностей сигналов, сжатие, паттерн-завершение (заполнение рабочей памяти), консолидация (запись в долговременную память), хранение и вызов из памяти эпизодов реализуются в сложном взаимодействии нейросетевых, клеточных и субклеточных механизмов (в работе рассматривается нейросетевой уровень).

Следы эпизодической памяти (энграммы) будем рассматривать как расположенные и индивидуализированные вдоль линии временного континуума, отступающего от настоящего в прошлое. Это соответствует записи и хранению информации. Напротив, вызов из памяти эпизодических последовательностей событийных сигналов должен быть реализован в реверсном порядке, чтобы соответствовать исходному временному порядку следования событий в эпизоде.

Линию временного континуума будем представлять логарифмически сжатой, вследствие чего местоположения новых событий (объектов) легче отличаются друг от друга, чем более удаленные в прошлое «сливающиеся» временные позиции «старых» событий.

Способ сохранения временного порядка последовательности событий основан на целом наборе нейросетевых инструментов и нейробиологически обоснованных механизмов, обнаруженных экспериментально в последние годы:

- кросс-частотном связывании быстрой и медленной осцилляторной активности нейронов (в частности, тета-гамма-ритмов);
- фазовой прецессии гиппокампальных клеток места и энторинальных решетчатых клеток в двигательном поведении субъекта;
- популяционном фазовом кодировании событийных сигналов в связанной тета-гамма-ритмической активности;
- свободно масштабируемых нейронных сетях гиппокампа и энторинальной коры, позволяющих сохранять и извлекать информацию в экспоненциально длинных временных шкалах;
- градиентных представлениях эпизодов в виде активности специфических клеточных ансамблей, в том числе перекрывающихся во времени;
- канонических растормаживающих микросхемах интернейронов и основанных на них ипси- и контралатеральных представлениях эпизодов в эгоцентрической системе референтности субъекта;
- аналоговых подпороговых сигналах, более слабых, чем импульсные сигналы, но значительно более частых, что позволяет эффективно управлять гиппокампальными схемами памяти;
- реляционном характере отношений, т.е. способности представлять связи (отношения) между объектами и событиями и запоминать их в пространственно-временном контексте.

Разработка теоретических основ и создание модели нейросетевого масштабно-инвариантного представления временной истории событийных последовательностей, их записи и вызова из памяти является нетривиальной проблемой. В настоящее время преобладающим измерением активности мозговых структур служит частота активности нейронов и их популяций [11, 12]. Построение карт активности мозга животных опосредуется частотой активности энторинальных решетчатых клеток, клеток места, дирекциональных и других пространственно-специфических клеток, как, впрочем, и в неинвазивных исследованиях отделов головного мозга, которые активируются во время кодирования памяти у человека [13]. Ранее нами был разработан оригинальный метод фазового кодирования событийных паттернов входных сигналов, допускающий возможность визуализации истории эпизода в виде семейства кривых фазовых ответов всех нейронов сети [1]. В настоящей работе также был использован фазовый подход.

Нашей целью является формирование памяти продолжительной истории эпизодов, т.е. крупномасштабных временных представлений, с опорой на гипотезу о масштабной инвариантности пространственно-временного контекста и его вызова из памяти. Гипотеза о том, что популяции клеток могут поддерживать масштабно-инвариантную историю подобно масштабно-инвариантному краткосрочному буферу памяти, сохраняя в долговременном масштабе тот же самый временной порядок последовательностей паттернов сигналов (следов памяти), который отпечатался в краткосрочной памяти, имеет большую перспективу фундаментального и прикладного характера.

Идея создания внутренних нейронных представлений включает в себя не только информацию о том, какие события или стимулы испытаны, но также время и порядок, в котором они были испытаны субъектом. Кроме того, известно, что эти нейронные представления со временем постепенно изменяются даже в краткосрочных масштабах нескольких, возможно десятков, минут. Это постепенно меняющееся нейронное представление может быть восстановлено с помощью «прыжка назад во времени» и уже получило экспериментальное подтверждение при вычислительном моделировании малоразмерных (до 250 нейронов) сетей с четным циклическим торможением [2, 14].

Долговременные масштабы эпизодической памяти ставят серьезные вычислительные проблемы не только при моделировании процессов ее формирования и вызова, но, вероятно, и перед биологической памятью, которая по своей сути является аналоговой. Биологическая память не

является простым смещением регистра, т.е. окна, продвигающегося назад в историю и требующего ресурсов хранения, которые линейно растут с представленной шкалой времени. Способность памяти представлять эпизоды в протяженных временных масштабах у организмов происходит за счет отказа от точной информации о том, когда событие или стимул был испытан – эта неопределенность становится больше для событий, более отдаленных в прошлое. Иными словами, жертвуя временной точностью информации, можно сохранить относительный временной порядок событий в эпизоде, что жизненно важно для приобретения опыта и предсказаний в долгосрочных временных масштабах.

Принципиальный вопрос заключается в том, каким образом осуществляется вызов из долговременной памяти эпизода. Недавно экспериментально, с использованием весьма тонкой методики с применением оптогенетической стимуляции в частных фазах эндогенно генерированных тета-осцилляций и сигналов обратной связи удалось показать, что на восходящей и нисходящей фазах тета-волны происходит отделение кодируемой от вызываемой из памяти информации. Иными словами, процессы кодирования и вызова информации разделяются уже на уровне отдельного тета-цикла: в наиболее «уязвимой» восходящей фазе, близко к максимуму (пику) волны, происходит кодирование событийных паттернов сигналов, а в ее нисходящей фазе, близко к минимуму волны, – вызов из памяти [15].

Идея подобного разделения тета-цикла на специфические временные окна (фазы) кодирования и вызова информации ранее уже предсказывалась в литературе и обосновывалась необходимостью отличать нейросетевую активность, которая отслеживает текущее состояние пространственного окружения от активности, которая отражает предшествующий опыт при обработке эпизодов пространственной навигации и, соответственно, предотвращает их интерференцию [16].

Установленное экспериментально разделение фаз кодирования и вызова не означает, конечно, что новая информация кодируется, а сохраненная информация вызывается из памяти в каждом тета-цикле. Однако, когда кодирование и вызов происходят, они могут быть предпочтительно активны в различных фазах, чтобы эффективно использовать временную структуру активности в энторинально-гиппокампальном контуре [17]. Подчеркнем, что эти данные имеют важное значение для различных внешних манипуляций, нацеленных на специфическую фазу тета-цикла, как в исследованиях на моделях животных нарушений эпизодической памяти, так и в вычислительных компьютерных исследованиях. В самом деле, если процессы кодирования и вызова являются наиболее активными в разных временных окнах тета-цикла, то последствия фазоспецифических внешних воздействий должны зависеть от поведенческого контекста. Манипуляции, которые изменяют гиппокампальные выходы в одной фазе тета, могут оказать сильное влияние на поведение, когда информация кодируется, но не оказывать никакого эффекта (или противоположного эффекта), если они происходят во время, когда информация вызывается. И наоборот, манипуляции, которые происходят со смещением фазы на 180°, могут оказать свое поведенческое влияние, ограниченное интервалами, в которых используется вызванная из памяти информация для управления поведением, но не будет оказывать никакого влияния (или противоположного эффекта) во времена, когда информация, важная для задачи, кодируется [15].

Следующий важный вопрос состоит в том, что эпизодическая память может быть вызвана с различными уровнями детализации, т.е. разрешения: от детального воспроизведения специфических событий в одиночном опыте до широкого обобщения многочисленных связанных опытов. Имеются свидетельства, что у грызунов нейронные представления, отражающие специфичность или общность воспоминаний (памяти), дифференцированно представлены вдоль дорзовентральной оси области CA3 гиппокампа. В дорзальном CA3 нейроны быстро ассоциируют (связывают) идентичность событий со специфическими местоположениями, в то время как в более вентрально расположенных регионах CA3 нейроны постепенно (градуально) аккумулируют информацию в многочисленных опытах, чтобы сформировать представления, которые обобщают связанные события в пространственном контексте и различают события среди разных контекстов. Эти результаты предполагают, что вентральный гиппокамп интегрирует связанные события внутри контекста через широкие пространственные и временные масштабы [18].

В магнитно-резонансных томографических исследованиях человека, в которых сравнивали места функциональных активаций вдоль антериально-постериальной оси гиппокампа (аналогично вентральному и дорзальному гиппокампу грызунов), получены полностью согласующиеся результаты. L. Nadel с коллегами сравнивал активации вдоль дорзовентральной оси, когда субъекты запоминали либо общий пространственный контекст, в котором произошел эпизод, либо детальные пространственные отношения между событиями, и сообщил, что запоминание пространственного контекста значительно сильнее активировало антериальный (передний) гиппокамп, тогда как запоминание детальных пространственных отношений более сильно активировало постериальный (задний) гиппокамп [19]. Эти результаты предполагают, что гиппокамп человека также может поддерживать градуальные уровни представления событий, подобно наблюдениям на нейронном уровне, описанным у крыс. Таким образом, гиппокамп, по-видимому, использует непрерывное «топографическое» сохранение эпизодов в памяти, которое простирается от представлений высокоспецифических одиночных событий до представлений многочисленных событий, которые связаны различными пространственными контекстами.

Последний результат в наших модельных исследованиях уже получил предварительное подтверждение и в настоящее время проходит дальнейшую проверку.

Результаты моделирования

В результате модельных исследований сетевой нейродинамики нами показаны:

1) пространственно-временная масштабная инвариантность нейросетевых фазовых представлений на примере различных тестовых эпизодов;

2) фазовое кодирование в широком диапазоне пространственно-временных шкал, сопровождаемое реверсированием событийных последовательностей эпизода;

3) вызов из памяти, позволяющий восстановить первоначальный (исходный) временной порядок следования событий в эпизоде;

4) градуальное «топографическое» сохранение эпизодов и вызов событийных последовательностей с различным пространственно-временным разрешением вдоль «вертикальной оси» многослойных сетей с четным циклическим торможением.

В докладе будут представлены демонстрации перечисленных результатов моделирования.

Литература

1. *Цукерман В.Д., Кулаков С.В., Золотухин. В.В.* От фундаментальных нейронных представлений пространственного окружения к математическому моделированию и созданию электронного «мозга-трансформера» // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2013 : III всерос. научн. конф. Н. Новгород, 2013. С. 179–182.

2. *Цукерман В.Д., Харыбина З.С., Кулаков С.В.* Математическая модель пространственного кодирования в гиппокампальной формации. II. Нейродинамические корреляты ментальных траекторий и проблема принятия решений // Математическая биология и биоинформатика. 2014. Т. 9, № 1. С. 216–256.

3. *He B.J.* Scale-free brain activity: past, present, and future // Trends Cogn. Sci. 2014. V. 18. P. 480–487.

4. *Kello C.T., Brown G.D.A., Ferrer-i-Cancho R., Holden J.G., Linkenkaer-Hansen K., Rhodes T., Van Orden G.C.* Scaling laws in cognitive sciences // Trends Cogn. Sci. 2010. V. 14. P. 223–232.

5. *O'Keefe J., Dostrovsky J.* The hippocampus as a spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely moving rat // Brain Res. 1971. V. 34. P. 171–175.

6. *Hafting T., Fyhn M., Molden S., Moser M.-B., Moser E.I.* Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex // Nature. 2005. V. 436. P. 801–806.

7. *Moser E.I., Kropff E., Moser M.B.* Place cells, grid cells, and the brain's spatial representation system // Annu. Rev. Neurosci. 2008. V. 31. P. 69–89.

8. *Tulving E.* Precis of elements of episodic memory // Behav. Brain Sci. 1984. V. 7. P. 223–268.

9. *Dragoi G., Tonegawa S.* Preplay of future place cell sequences by hippocampal cellular assemblies // Nature. 2011. V. 469. P. 397–401.

10. *Dragoi G., Tonegawa S.* Selection of preconfigured cell assemblies for representation of novel spatial experiences // Phil. Trans. R. Soc. B. 2014. V. 369. 20120522.

11. *Mizuseki K., Buzsaki G.* Preconfigured, skewed distribution of firing rates in the hippocampus and entorhinal cortex // Cell Reports. 2013. V. 4. P. 1–12.

12. *Buzsaki G.* Our skewed sense of space // Science. 2015. V. 347. P. 612–613.

13. *Burke J.F., Long N.M., Zaghloul K.A., Sharan A.D., Sperling M.R., Kahana M.J.* Human intracranial high-frequency activity maps episodic memory formation in space and time // NeuroImage. 2014. V. 2. P. 834–843.

14. *Kharybina Z.S., Tsukerman V.D., Kulakov S.V.* Mathematical model of the microcircuit organization of freely scalable ECI–network as a former of spatial processing in hippocampal-entorhinal brain system // J. Applied Math. Sci. 2014. V. 8, № 12. P. 549–572.

15. *Siegle J.H., Wilson M.A.* Enhancement of encoding and retrieval functions through theta phase-specific manipulation of hippocampus // eLife. 2014. V. 3. e03061. P. 1–18.

16. *Kunec S., Hasselmo M., Kopell N.* Encoding and retrieval in the CA3 region of the hippocampus: a model of theta phase separation // J. Neurophysiol. 2005. V. 94. P. 70–82.

17. *Mizuseki K., Sirota A., Pastalkova E., Buzsaki G.* Theta oscillations provide temporal windows for local circuit computation in the entorhinal-hippocampal loop // Neuron. 2009. V. 64. P. 267–280.

18. *Komorowski R.W., Garcia C.G., Wilson A., Hattori S., Howard M.W., Eichenbaum H.* Ventral hippocampal neurons are shaped by experience to represent behaviorally relevant contexts // J. Neurosci. 2013. V. 33. P. 8079–8087.

19. *Nadel L., Hoscheidt S., Ryan L.R.* Spatial cognition and the hippocampus: the anterior-posterior axis // J. Cogn. Neurosci. 2013. V. 25. P. 22–28.

Архитектура как информация

О.Н. Чеберева

Нижегородский архитектурно-строительный университет

Архитектура как объект исследования характеризуется массой проблемных зон, белых пятен в предмете исследования – архитектурной морфологии, в которой неясны предельные общие порождающие начала, а семантика морфотипов связывается с формальным их описанием опосредованно в ряде частных случаев. Схожие проблемные поля отмечены профессором Добрицыной [2] в отношении таких предельно всеобъемлющих, онтологических приемов организации архитектурной формы, как метр и ритм. Теория архитектуры много и подробно говорит о формах архитектуры различных стилей, но не сводит их к единому знаменателю.

Культурологи и урбанисты говорят о том, что любое явление художественной культуры, в том числе архитектуры, градостроительства и монументально-декоративного искусства, неразрывно связанного с архитектурно-пространственной средой, следует рассматривать как информационное сообщение, разновидность внешней памяти человечества [3]. Успешные варианты «расшифровки» семантического и формализованного информационного «содержания» архитектурной формы культурологического, искусствоведческого и конструктивно-геометрического плана содержатся в работах И.А. Добрицыной, Н.А. Сапрыкиной, Ч. Дженкса, С.Л. Агафонова и других. Семантическое, образное содержание форм архитектуры не ставится в зависимость от формального. С.Л. Агафонов говорит о том, что «архитектура – это информация о природе», но каждый архитектурный стиль «передает» ее на своем языке [4]. По мысли С.Л. Агафонова, «Архитектура – это воплощение в пластических и пространственных формах законов природы так, как они понимаются в данный исторический период коллективным сознанием в господствующем общественном мировоззрении всего народа или какой-либо его части, социального слоя, жителей определенной территории и т.п.» [4]. Агафонов рассуждает, что понятие «мировоззрение» включает глубинные, подсознательные слои психики человека, которые уже определяют его поведение, хотя он еще не успел их осмыслить. Он подчеркивает, что подсознательное в определенные периоды времени, в определенном месте объединяет социальные группы людей, сообщая им единство миропонимания и мироощущения. Сопоставив позицию Агафонова с аналитической психологией К. Юнга об индивидуальном и коллективном бессознательном, можно смело говорить о том, что коллективное сознание делится на осознанную и бессознательную части. Осознанная часть представляет собой познавательные и деятельностные установки человека или социальной общности, «...в понятии "познание" объединяются все достижения социального, научного и технологического опыта на данный период времени» [4]. При этом «процесс познания в истории имеет волнообразный характер, периоды накопления опыта сменяются периодами его обобщения», что тесно смыкается с практикой современного научного применения общей теории колебаний, используемой не только в областях точных наук, таких как физика [4]. Агафонов говорит о системе постоянного чередования синтетических и аналитических архитектурных стилей. При этом в морфогенезе аналитических стилей доминирует логическое конструктивное начало сознательной деятельности, а морфогенез синтетических стилей использует прежние конструктивные и логические наработки с целью насыщения формы новыми, усложненными образными началами, апеллирующими к бессознательному. Язык формы всегда воспринимается в первую очередь бессознательным, но при этом соответствует когниции, т.е. познаваем. Если архитектура, как и все феномены культуры, факт коммуникации, то расшифровка возможна в соотнесении с кодом, поскольку связь знаковых систем с отражаемой реальностью не прямая, опосредованная. Код обнаруживается сведением «сообщений» типологического множества в единую систему и строится как система сочетаний смыслообразующих единиц. Буквы, символы, элементы любого языка, как формального, так и «живого», являются узнаваемыми элементами, потому что они уже были познаны. Буквы «языка» архитектурной формы должны «прочитываться» напрямую бессознательным. Будучи практикующим специалистом, К. Юнг опытным, практическим путем доказал, что наше бессознательное фиксирует больше информации, чем сознание. Учение К. Юнга о коллективном сознательном и бессознательном своеобразно трактовал в своей концепции антропологических структур воображения его ученик, Жильбер Дюран, опиравшийся на исследования Бехтерева и статистические данные психологических семинаров «Эранос». Логос Дюрана обозначает активную, деятельную логическую, познающую часть сознания, а Мифос – бессознательное. При этом следует заметить, что физиологически информация бессознательного и осознанная часть информации обрабатывается нейронными структурами головного мозга. Т.В. Черниговская свидетельствует: «Язык не столько средство коммуникации, сколько средство формирования внутренних понятий» [10]. Действительно, чем более упрощенными понятиями оперирует самосознание человека, тем беднее средства его коммуникации. (Следует заметить, что подобная зависимость характерна не только для вербальных средств коммуникации, но

и для формальных языков, таких как язык математических описаний, и для языков графической формализации, таких как техническая графика, и для средств формально-эстетической коммуникации, таких как рисунок, живопись и т.д.) Если следовать этой логике, то структуры предельной формализации языка архитектуры должны быть присущи сознанию и бессознательному совершенно естественно, вне культурного контекста, их доступность должна быть одинаковой как для активного творческого воображения, так и для восприятия – пассивно-созерцательного и аналитического.

Агафонов считает: «Подтверждение цикличности… перемен можно видеть во всей истории европейского искусства, а их наглядное выражение – в смене архитектурных стилей. Можно уточнить: в смене систем структурного построения архитектурной формы. Именно это является главным признаком стиля в архитектуре, тогда как внешний облик сооружения – лишь его оболочка, одежда, через которую система построения находит свое выражение» [4]. Современные психологи и физиологи в основу словесно-логического и образного мышления полагают слово и образ (в основном зрительный образ). С определенной уверенностью можно предположить, что физиологические основы у них взаимосвязаны [9]. Массовое восприятие архитектурных форм традиционно отождествляется с эстетическим, художественным восприятием, в противовес логическому – формальные и содержательные качества архитектурной формы апеллируют и воспринимаются напрямую бессознательным. С точки зрения физиологии восприятие информации от органов чувств является сложной аналитико-синтетической деятельностью головного мозга, основой мышления. По И.П. Павлову, «мышление... ничего другого не представляет, как ассоциации, сперва элементарные, стоящие в связи с внешними предметами, а потом цепи ассоциаций». Вызываемые раздражителями связи (ассоциации) составляют физиологическую основу процесса мышления. Опыты К. Юнга и учеников свидетельствуют о том, что не только мышление, но и бессознательное восприятие имеет в основе ассоциации в физиологическом смысле (связей между клетками) и в художественном смысле – как образы, пробуждающие в сознании когнитивные процессы. Просто осознан в конкретный момент времени может быть один процесс. В этой связи становится понятной правота Ж. Дюрана, утверждающего, что художественное, бессознательное – так называемый мифос в человеческом сознании превосходит по объему логическое – логос [1]. Мифос – содержание бессознательного (еще не познанного, но ощутимого при помощи разного рода «сенсорных инпутов», либо познанного и перекодированного, зашифрованного в качестве смысловых, эстетических и культурных стереотипов, вытесненных в коллективное бессознательное). Мифос – романтика художественного, манящий мир ирреального, загадочного, портал в «трансцендентное» творчество, не имеющее логических границ, на самом деле имеет истоки в «церебральной» реальности психофизиологии высшей нервной деятельности, представляет собой ассоциативные начала дивергентного подхода к решению творческих задач. На этом механизме строятся восприятие (наблюдение) и расшифровка (анализ) архитектурной формы, являющиеся задачей не конвергентного, а вновь дивергентного плана. История архитектуры развивается по пути поиска наиболее общих образов чувственного восприятия – по пути формализации, т.е. предельно возможного абстрагирования, обобщения символов перцептивного прочтения. Первичной модальностью сенсорного восприятия, обуславливающей мышление, является филогенетическая, а именно те возможности чувственного восприятия и обработки поступающей информации, которые заложены генетически. Образное, образно-наглядное и образно-теоретическое мышление не более примитивно, чем вербальное, но более физиологично и менее обусловлено социально.

Поиск элементарных морфологических единиц архитектуры, универсальных для всех стилей и имеющих семантический подтекст формализованных метафор формообразования объектов живой и неживой природы, «элементарной частицей» которого по аналогии с математическими приемами рассуждения принимается материальная точка и пути ее тиражирования и перемещения в пространстве, заставляет обратить на концепцию структур воображения Дюрана пристальное внимание. Режимы воображения Дюрана имеют глубокие корни в психофизиологии и геометрические когниции одновременно. Правота Дюрана и прикладное значение концепции в архитектуре подтверждается исследователем методики архитектурного проектирования Б.Г. Бархиным, ссылающимся на исследования П. Фресс и Ж. Пиаже, Я.А. Пономарева: «Согласно данным экспериментальной психологии, интеллектуальная деятельность связана с двигательной в том смысле, что развитие первой зависит от характера второй» [5]. Теория поэтапного формирования умственных действий П.Я. Гальперина рассматривает предметное действие «как психологически первичную форму» деятельности, которая формирует и определяет направление и качество профессиональной деятельности, что соответствует сути постулярного режима воображения, в котором отражены ментальные репрезентации биомеханики опорно-двигательного аппарата [5]. Поиск смыслообразующих единиц архитектурной формы следует осуществлять на стыке когнитивного аспекта психофизиологии и биофизики функциональных систем высшей нервной деятельности человека, принимая во внимание современные научные данные о биомеханике, биофизике нейро-сенсорных систем и помещая в основу триаду Дюрана в тесной связи с триадой системно-деятельностной парадигмы (социогенетической, филогенетической и онтогенетической модальностями мышления) отечественных психофизиологов [9]. Основным ме-

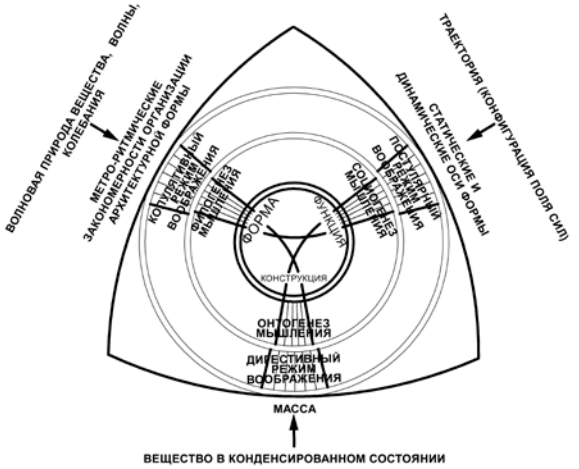
тодом и направлением исследовательской работы в этом направлении является сопоставление имеющихся «прочтений» семантических и конструктивно-тектонических значений архитектурной формы и композиции, биологии на стыке с биомеханикой и когнитивными исследованиями и биофизикой [7]. Воображение – работа с «образом», навык высшей нервной деятельности не только получать и расшифровывать сенсорную информацию, но и оперировать ею, анализировать, комбинировать, синтезировать. Индивидуальное воображение опосредовано в зависимости от индивидуального опыта, на базе информации, полученной по нервным каналам мозгом от органов чувств. Преобладание той или иной модальности воображения связано с обусловливающими и детерминирующими мышление факторами. А это та информация о внешнем мире, которую организм способен пропустить через себя от природы, т.е. на основе филогенетических возможностей упорядоченная сознанием в процессе онтогенеза организма индивидуума [9]. И та обусловленность категорий мышления и самосознания, которая наработана индивидуумом в процессе взаимодействия с другими индивидуумами, – социогенетическая [9]. Дигестивный, копулятивный и постулярный – три равноправных режима воображения, связанные с особенностями физиологического функционирования и нейросенсорного восприятия сигналов, поступающих из внешней среды. Постулярный режим воображения связан с инстинктом прямохождения, дигестивная – с потребностью в пище, копулятивная – с потребностью в ритмизации жизни, построении связей. Постулярный режим обусловлен функциональными особенностями опорно-двигательного аппарата, прямохождением, биомеханикой, ощущениями равновесия, тяжести и пр. В архитектурных формах постулярному отвечают направления развития композиции элементов объекта по трем пространственным координатам, в том числе те, что режиссируют передвижение индивидуума вокруг и внутри объекта. В традиционной архитектуре это оси зеркальной симметрии – основное средство антропоморфизации архитектуры. Форма и функция связаны в архитектуре, в природе и в философско-онтологической трактовке этих понятий. Постулярный режим воображения соответствует конфигурации траекторий функциональных процессов в здании, и его сквозная организующая, осевая роль в композиции выявляет типологическую принадлежность сооружения.

В традиционной архитектуре до начала XX в., в неоклассицизме и ампире, постулярному режиму воображения отвечают оси симметрии, вертикальные и горизонтальные оси тиражирования (симметрии переноса) форм. Ось симметрии рукотворной формы любого порядка – проявление постулярного режима воображения. Доминирование постулярного в архитектуре отличает стиль готики, средневековой арабской архитектуры, что подтверждает связь постулярного режима воображения и социогенетической модальности мышления (господство жестких социальных систем), в меньшей степени это заметно в архитектуре времени расцвета Римской империи. Канон зеркальной симметрии доминировал к архитектуре на протяжении тысячелетий и впервые заметно пошатнулся с приходом модерна. Семантически постулярному в архитектуре авангарда и так называемой нелинейной парадигмы принадлежат образы оси, траектории, векторов и направлений развития формы (эндо- и экзоскелетной основы формы), т.е. все образы направленного или распределенного воздействия усредненной силы, кинетической или потенциальной энергии системы. Концепция Дюрана в применении к архитектурной теории и практике исчерпывающе решает проблему возникновения так называемых генетических архетипов – первоэлементов архитектурной структуры – метра, ритма, пропорций и пластики масс, структурного каркаса, направляющих развитие пластических закономерностей композиционных осей [2].

Проблема архитектурной метафоры, лежащая в поле теории архитектуры, зиждется на проекции нашего ощущения силы земного притяжения, устойчивости, упругости, пластичности, ритмичности и пр. на конструкции и формы в архитектуре [8]. Дигестивный режим воображения воплощается в массе формы. Сложнее решается проблема такого неотъемлемого первоэлемента архитектурной композиции (структуры), как пространство, метафорической антитезы массы. Если рассматривать массу, материальность форм архитектуры как метафору вещества в конденсированном состоянии, то ему противостоит вакуум, у Дюрана воображению и его режимам противостоит время-смерть. В физическом же смысле время появляется там, где существует материя. Психофизиологическая обусловленность копулятивного режима воображения заключается в том, что нервная (сенсорная, перцептивная, перцептивно-когнитивная) функциональная активность сопряжена с биоэлектрическими переменными токами, порождающими колебания и возбуждающими низкоэнергетические электромагнитные поля. То есть «сенсорный инпут» существенно «многоканальнее» того, что традиционно связан с перцепцией органов чувств. В предельном обобщении упорное желание человека упорядочивать формы путем использования метро-ритмических рядов, убывающих, нарастающих (часто находящихся во фрактальной зависимости) и монотонных членений, а также пропорционирования – совокупность соответствующих копулятивному режиму воображения, из глубин бессознательного транслирумых образов, связанных с волновой природой материи как таковой и вещества в конденсированном состоянии в частности. Концепция Дюрана и многие архитектурные исследования, например Ю. Паллсмаа, прямо ставят вопрос о преобладании бессознательного в творчестве. Согласно К. Юнгу, бессознательное впитывает и сохраняет из окружающего мира больше информации, чем сознание, упорядочивая ее вне целеполагания индивидуума. Ис-

ходящее из глубин бессознательного, интуиции может являться неосознаваемой информацией о природе Вселенной, интерпретированной саморефлексией индивидуума. Предположительно бессознательное фиксирует и транслирует образы физических явлений и систем, воспринимая их опосредованно из окружающего мира, взаимодействуя с ним во внешней среде и непосредственно в собственном организме. Возможно, именно в этом неосознанном стремлении к порядку, к различным видам повторения и иерархии элементов кроется ответ на вопрос, почему структура самых примитивных палеолитических архитектурных объектов стремится к регулярности. Главный парадокс подхода в том, что копулятивное, дигестивное и постулярное начала архитектурной формы являются не только элементарными частицами (расположение и параметры подлежат математическому описанию в случае самых сложных форм), но и началами формообразования, и его предельно общими топическими категориями. При этом они настолько взаимосвязаны, насколько и взаимозависимы: составляющие формы, и они же операторы. То есть основа кода архитектурной формы – воспринимаемые визуально аналогии сил и явлений природы. Культурные коды форм и стилей – их сложные комбинации (композиции), способные «включить», т.е. возбудить, биоэлектрическую активность сложных композиций (совокупности клеток, их пространственных связей) клеток и связей в головном мозге, благодаря работе которых возможна их информационная расшифровка, соотнесение, сопоставление, сравнение, распределение по категориям [6], т.е. когнитивные процессы.

В основе эстетических канонов и композиционных приемов при глубоком рассмотрении обнаруживаются изобразительные или предельно-обобщенные, абстрактного плана ассоциации с физическими явлениями и закономерностями организации макромира и микромира. Это очевидно в современной архитектуре XX и XXI в., в которой прямая натуралистическая изобразительность отдельной детали скульптурного плана и пластическая проработка фасадных плоскостей уступили место пластике крупных объемов и формальным эстетическим изысканиям. Место образа занимает схема образа: вместо атланта тяжесть конструкции выявляет конфигурация всего объема, которая в природе была бы нестабильна, неустойчива. Когнитивный корень прочтения образа един – ассоциация. Уникальность архитектуры как внешней памяти человечества в том, что она подобно «игре в бисер» Гессе аккумулирует синтез мифоса (чувственных, сенсорно-перцептивных, идеалов коллективного бессознательного) и логоса (совокупности знаний, умений, технологий, миропонимания) определенной эпохи в эстетически формализованных образах. Количественное соотношение «операторов» формы постулярного, дигестивного, копулятивного типов, пространственное распределение их в объекте архитектуры уникально для каждого стиля и подлежит формальному описанию. То есть, по сути, сочетание и пространственный порядок операторов – это идентификационный код стиля и в то же время – частный случай морфизма. При этом «операторами» формы являются так называемые генетические архетипы архитектуры, отражающие в виде геометрически формализованных в традиционной архитектуре и в современной – абстрактных метафор сознательную интерпретацию и бессознательную рефлексию сенсорно воспринимаемых человеком закономерностей природы (рисунок). Данные геометрические метафоры – структурная информация, заложенная в морфотипе объекта и его деталях, составляют основу любого культурного кода, т.е. всей той совокупности семантической, образной информации, которая может быть связана с формой в человеческом сознании.



Метафоры закономерностей природы в архитектуре: механизмы генерации, материализации и восприятия

Литература

1. *Duran J.* Les structures anthropologiques de l'imaginaire. Paris : PUF, 1960.

2. *Добрицына И.А., Азизян И.А., Лебедева Г.С.* Теория архитектуры как поэтика архитектурной композиции. М., 2002. 568 с.

3. *Глазычев В.Л.* Зарождение зодчества. М., 1983. 126 с.

4. *Агафонов С.Л.* История архитектуры. Н. Новгород, 2014. 240 с.

5. *Бархин Б.Г.* Методика архитектурного проектирования. М., 1993. 438 с.

6. *Миллер М.А.* Лекции по физике… и не только. Н. Новгород, 2014. 140 с.

7. *Сапрыкина Н.А.* Основы динамического формообразования в архитектуре. М., 2005. 312 с.

8. *Бернштейн Ж.А.* Опыт построения движений. М., 1947.

9. *Гусев А.Н.* Психофизика сенсорных задач : системно-деятельностный анализ поведения человека в ситуации неопределенности. М., 2004. 316 с.

10. *Черниговская Т.В.* Проблема преодоления неоднозначности: нужны ли язык и тело роботу? (К 60-й годовщине смерти Алана Тьюринга) : пленарная лекция // Третья всероссийская конференция «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях», 24–27 сентября 2013 года. [Электронный ресурс]. URL: http:// www. genlingnw.ru/person/Chernigovskaya.htm.

Естественно-конструктивистский подход к моделированию мышления: интерпретация эмоций в искусственной когнитивной системе

О.Д. Чернавская[1], Д.С. Чернавский[1], А.П. Никитин[2], Д.С. Щепетов[1]

[1]Физический институт РАН, Москва
[2]Институт общей физики РАН, Москва

Введение

В наших работах [1–3], основанных на естественно-конструктивистском подходе (ЕКП) к моделированию мышления, была предложена схема искусственной когнитивной системы. В данной работе мы исследуем вопрос о том, что именно в предложенной искусственной конструкции может имитировать *эмоции* в живой системе. Подчеркнем, что мы не пытаемся сконструировать систему, которая выполняла бы ряд задач ***лучше***, чем человек. Мы пытаемся понять, ***как*** может это делать человек. С этой точки зрения игнорировать роль эмоций невозможно.

Следует отметить, что эмоции достаточно сложно формализовать, прежде всего, потому, что общепринятое определение эмоций расплывчато. Эмоции (от латинского emoveo – потрясаю, волную) – определяются как эмоциональный процесс средней продолжительности, отражающий ***субъективное оценочное отношение*** к существующим или возможным ситуациям. При этом возможность сформулировать некое оценочное отношение уже предполагает *наличие сознания*. Кроме того, данное определение ничего не говорит о молекулярных механизмах появления эмоций. Очевидно, это понятие требует *междисциплинарного* подхода. В данной работе мы попытаемся сформулировать основные характеристики эмоционального процесса с точки зрения разных подходов и предлагаем его интерпретацию в искусственной мыслительной системе.

Попытки формализовать роль эмоций в мышлении очень популярны в последнее время (см., например, [4–8]). Обычно вводится некоторое количество дискретных эмоциональных состояний – их число варьируется от 2 (положительное и отрицательное) до 27 в [6], – которые, с соответствующими весовыми коэффициентами, влияют на модельные расчеты. В другом подходе вводятся «эмоциональные» и «рациональные» динамические переменные; их нелинейное взаимодействие обеспечивает разнообразие состояний системы [7]. Однако эти подходы оставляют неудовлетворенность (в частности, у самих авторов) в отношении нейрофизиологической интерпретации переменных. Еще один подход, так называемый реинжениринг мозга, основан на анализе роли и функций кортикальных и субкортикальных структур в процессе обучения [8]. Он представляется наиболее близким к цели, однако и в нем существуют трудности совместного описания мыслительной и эмоциональной деятельности.

В рамках ЕКП мы используем единый аппарат нелинейных дифференциальных уравнений для описания состояния и взаимодействия нейронов мозга в когнитивных процессах. В основе подхода лежит также динамическая теория информации (ДТИ, [9]). Следует подчеркнуть один из выводов ДТИ: если информация, согласно [10], есть *запомненный выбор одного варианта из ряда возможных*, то существует два способа ее получения: *генерация* (свободный или случайный выбор) и *рецепция* (отбор, или выбор, навязанный извне). Поскольку эти процессы дополнительны (дуальны), необходимы ***две разные подсистемы*** для реализации этих функций. При этом для генерации информации необходим *случайный элемент* (***шум***), т.е. фактор $Z(t)\xi(t)$, где $Z(t)$ – амплитуда, $\xi(t)$ – случайная функция ($0 < \xi < 1$), который *должен* присутствовать в подсистеме генерации.

Ниже будет показано, что такие конструктивные особенности подхода позволяют нам естественно ввести понятие эмоций в искусственную когнитивную систему.

Различные подходы к формализации эмоций

Подход с позиций теории эволюции

С эволюционной точки зрения эмоции представляют собой более древний механизм анализа окружения, чем мыслительная деятельность. Эмоциональный всплеск, порожденный структурами «старого мозга» (см. [8, 11]), представляет *синтетическую* (интегральную) реакция на окружающую среду в отличие от *аналитической* («рациональной»). Вообще деление на «эмоцио» и «рацио» начинается с того момента, когда человек приобретает ***язык*** (см., например, [12]), т.е. развитую структуру символов. Заметим, что язык представляет собой временной ряд символов [13], т.е. рациональное мышление относится к *последовательному* способу обработки информации. Тогда естественно предположить, что эмоциональная реакция соответствует *параллельному* способу. Вспоминая, что такое же разделение относят к левому (ЛП) и правому (ПП) церебральным полушариям соответственно [14], естественно предположить, что рациональное мышление относится к ЛП, а эмоции связаны с ПП.

Подход с позиций психологии

Согласно наблюдениям психологов (в частности, Э. Голдберга [15]), полушария головного мозга имеют четкую специализацию. ПП отвечает за восприятие нового, а ЛП – за обработку хорошо

известной информации. С этой точки зрения любая ***неожиданность*** (т.е. неверный или несделанный прогноз) требует включения ПП. С другой стороны, именно неожиданность всегда вызывает сильную (как правило, отрицательную) эмоциональную реакцию. Это наблюдение положено в основу нашего подхода к описанию эмоций в искусственной когнитивной системе.

Подход с позиций нейрофизиологии

С точки зрения нейрофизиологии эмоции зависят от уровня и состава нейромедиаторов в организме (см., например, [11]). Из всего разнообразия нейромедиаторов выделяют *возбуждающие* (адреналин и др.) и *тормозящие* (эндорфины, опиаты и др.). В этой связи разделение на два типа эмоций (несмотря на видимую «грубость») выглядит более адекватно.

Обе группы нейромедиаторов подразделяются на нейроамины и нейропептиды. Первые выделяются самими нейронами и влияют на поведение синапсов. Вторые действуют как локально, так и глобально на весь организм, влияя на вегетативное и психологическое состояние (в частности, на настроение).

Трудность формализации эмоций связана с тем, что химический состав – объективная и измеряемая характеристика, а эмоции – субъективная оценка собственного состояния, которая сама не всегда бывает осознана и формализована (сформулирована). Проблема перехода от нейромедиаторов к эмоциям подобна тому, как можно от изучения активности одного нейрона прийти к понятию «сознание» – это не невозможно, но действительно трудно. В частности, не ясно, что первично (проблема курицы и яйца) – эмоции или сознание? Иными словами, эмоции инициируют мыслительный процесс или результат мыслительной деятельности порождает эмоции?

Подход с позиций ДТИ

С точки зрения ДТИ наиболее конструктивно выглядит разделение эмоций на ***побуждающие*** (способствуют генерации информации) и ***закрепляющие*** (способствуют ее рецепции). Очень грубо и условно это разделение можно соотнести с отрицательными и положительными эмоциями.

Поскольку для генерации необходим *шум* (случайный фактор), естественно связать побуждающие эмоции именно с *повышением уровня шума.* Иными словами, нарастание величины $\Delta Z = Z(t) - Z_0$, т.е. $\partial Z/\partial t > 0$, активизирует *перемешивающий слой*, необходимый для решения творческих задач (т.е. тех, где ответ неизвестен). Тогда естественно предположить, что акт решения задачи должен сопровождаться *снижением уровня шума*, т.е. $\partial Z/\partial t < 0$ соответствует условно «положительным» эмоциям (радость, удовлетворение и др.). Как тот, так и другой процесс могут протекать плавно, а могут и скачком. Именно эта программа будет реализована ниже.

Интерпретация эмоций в искусственной когнитивной системе

Напомним, как именно в [3] строилась схема искусственной системы, основанная на концепции динамического формального нейрона и принципах ДТИ. Система состояла из двух подсистем, ПП и ЛП, которые условно можно соотнести с двумя церебральными полушариями. В качестве основного принципа (механизма) самоорганизации был выбран принцип «почернения связей»: все алгоритмы отрабатываются (вплоть до достаточно сильных, или «черных», связей) в ПП, где связи в ПП обучаются по Хеббу [16]. Затем «выученные» алгоритмы рецепцируются (передаются по прямым связям между подсистемами) в ЛП, где связи обучаются по Хопфилду [17], т.е. по принципу «отсечения лишнего». Связи между подсистемами $\Lambda(t)$ не обучаются, а «включаются» в зависимости от состояния системы и решаемой задачи.

Подчеркнем, что значение амплитуды шума $Z(t)$ ранее не конкретизировалось, а механизм активизации связей $\Lambda(t)$ не обсуждался.

Наша основная концепция заключается в следующем: ***случайный фактор (шум) в искусственных системах имитирует эмоциональный фон в системах живых. Изменение амплитуды шума dZ(t)/dt может быть интерпретировано как проявление эмоций.***

Для того чтобы согласовать данную концепцию с нейрофизиологией, мы должны связать величину dZ/dt с переменной, которая представляет собой аналог состава нейромедиаторов в живом организме. Уровень глобальных нейромедиаторов может быть учтен путем введения агрегатной переменной $\mu(t)$, которая представляет собой разность между уровнем стимулянтов и ингибиторов. Мы предполагаем, что дисбаланс возникает в результате некоторого внешнего воздействия, так что в нормальном состоянии $\mu_{st} = 0$.

Что касается локальных нейромедиаторов, их продукция должна быть напрямую связана с когнитивным процессом: само понятие «обученные связи» означает, что формируется определенный набор нейромедиаторов $\{\mu_{ki}\}$, специфичный именно для данной синаптической связи.

Учитывая все эти соображения, мы предлагаем следующую систему уравнений для взаимного влияния уровня шума и состава нейромедиаторов:

$$\frac{dZ(t)}{dt} = \frac{1}{\tau^Z}\cdot\{a_{Z\mu}\cdot\mu + a_{ZZ}\cdot(Z - Z_0) + F_Z(\mu, Z) + \\ + \chi\cdot D - \sum_{\sigma,k}\nu_k^\sigma\cdot[\sum_i^{M_k^\sigma}\{\mu^\sigma{}_{ik}\}]\cdot\delta(t - t_{k\sigma}^*)\}, \quad (1)$$

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{1}{\tau^\mu}\cdot\{a_{\mu\mu}\cdot\mu + a_{\mu Z}\cdot(Z - Z_0) + F_\mu(\mu, Z)\}, \quad (2)$$

$$\Lambda(t) \propto \Lambda_0\cdot th\left(\gamma\cdot\frac{dZ(t)}{dt}\right), \quad (3)$$

где a, χ, ν, γ – параметры модели; τ^μ, τ^Z – характерные времена изменения μ и Z. Подчеркнем, что

все эти параметры индивидуальны для данной искусственной системы.

Эти уравнения написаны в общем виде для учета следующих факторов:

- стационарное состояние $\{Z = Z_0, \mu = 0\}$ должно быть устойчивым, так что линейные по Z и μ члены описывают стремление к гомеостазу;
- члены $F(\mu,Z)$ учитывают возможное нелинейное взаимодействие, что позволяет описать нетривиальные эффекты (см. ниже).

Два последних члена относятся именно к когнитивному процессу (подробно изложено в [18]):

- *невязка* D в процессе обработки информации, т.е. расхождение между поступающей и хорошо известной (хранящейся в ЛП) информацией, провоцирует рост амплитуды шума, т.е. отрицательные эмоции;
- учет агрегатного вклада основного элементарного акта – формирования символа в ПП и передачи его в ЛП. Каждый k-й символ уровня σ вносит вклад в понижение $Z(t)$ (обеспечивая положительные эмоции) не непрерывно, а именно в момент его формирования $t^*_{k\sigma}$.
- уравнение (3) регулирует активность подсистем в зависимости от знака производной: здесь $\Lambda < 0$ и $\Lambda > 0$ соответствуют $\Lambda^{ПП\to ЛП}$ и $\Lambda^{ЛП\to ПП}$.

Таким образом, блок уравнений (1)–(3) представляет собой решение проблемы «яйцо или курица» путем учета взаимного влияния когнитивных и «химических» процессов. Подчеркнем, что в рамках нашей концепции снижение величины $Z(t)$ (соответствующее положительным эмоциям) должно быть непосредственно связано с актом формирования символа – ключевым моментом для формирования (т.е. создания) всей системы (см. [18]). Это представляется естественным: каждая (даже искусственная) система должна радоваться факту своего рождения.

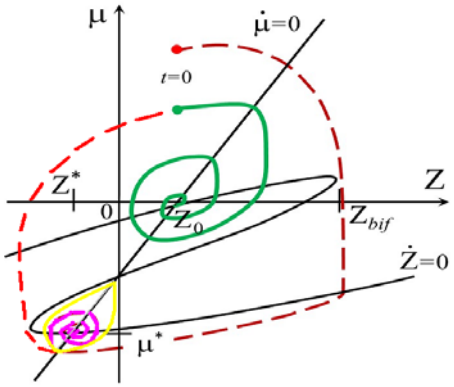
Подчеркнем, что данные уравнения представляют собой *базовую* модель, которая должна быть конкретизирована для решения различных задач. В практических целях эти уравнения могут быть использованы для описания конкретных наблюдаемых эффектов.

Пример приложения модели к описанию эффекта «стресса и шока»

Продемонстрируем возможности модели на примере описания экспериментально наблюдаемого эффекта «стресса и шока». Этот эффект, характерный для людей, находящихся в чрезвычайных обстоятельствах, изучался в течение долгого времени группой нейрофизиологов [19, 20]. Измерялись две специальные характеристики ЭКГ: индекс вегетативного баланса (ИВБ) и индекс сердечной вариабельности (ИСВ). По смыслу эти величины соответствуют переменным $\mu(t)$ и $Z(t)$ в нашей модели. Было показано, что при малых и средних воздействиях эти индексы изменяются в нормальном режиме колебательного характера. При сильном воздействии начальное возбуждение сменяется депрессией, и только после долгого времени поведение индексов возвращается в нормальный режим. Такой тип поведения был назван стрессом. Кроме этого, наблюдался тип поведения, названный шоком, при котором испытуемый впадал в глубокую депрессию и не мог вернуться к нормальному режиму без посторонней (медицинской) помощи. В последнем случае вегетативный баланс контролировали только опиаты, а ИСВ был аномально низким. Важно отметить, что мера «аномального» внешнего воздействия была индивидуальна для каждого испытуемого.

Подобное поведение можно описать в рамках предлагаемой модели. Рассмотрим динамику амплитуды шума, вызванную только внешним воздействием (пренебрегая при этом чисто когнитивной составляющей). Выберем параметры модели так, чтобы форма изоклин допускала три стационарных состояния, причем два из них, $\{Z_0,0\}$ и $\{Z^*,\mu^*\}$, есть стабильный фокус, третье же неустойчиво (см. рисунок).

В нормальном режиме поведение интегральных кривых соответствует затухающим колебаниям вокруг положения гомеостаза $Z = Z_0$, $\mu = 0$ (сплошная зеленая кривая на рисунке). При больших внешних воздействиях амплитуда колебаний резко увеличивается, причем длительное время изображающая точка проводит в области $Z < 0$, $\mu < 0$, что соответствует депрессии. Однако затем траектория возвращается к нормальным колебаниям (красная пунктирная кривая на рисунке). Этот режим качественно соответствует «стрессу».



Фазовый портрет на плоскости Z – μ в случае двух стационарных состояний $\{Z_0, 0\}$ и $\{Z^*,\mu^*\}$

Кроме того, существует область притяжения второго устойчивого фокуса $\{Z^*,\mu^*\}$, отделенная от остального фазового пространства сепаратрисой (желтая кривая). При приближении интегральной кривой к этой области малое дополнительное воздействие может привести к тому, что изображающая точка «перескакивает» через сепаратрису и выйти на нормальный режим самостоятельно, т.е. без жесткого внешнего воздействия, уже не может (розовая кривая). Последний режим естественно интерпретировать как «шок».

Таким образом, описанные режимы качественно согласуются с экспериментальными наблюдениями. Вопрос о количественном согласии требует дополнительного анализа.

Заключение

Показано, что в рамках ЕКП эмоции оказываются *с самого начала* встроены в модель искусственной мыслительной системы. Основная гипотеза состоит в том, что изменение амплитуды шума $dZ(t)/dt$ в искусственной когнитивной системе соответствует эмоциям в живой системе. Кроме того, именно эта производная контролирует «диалог» между двумя подсистемами ПП и ЛП, т.е. знак производной определяет направление связей $\Lambda(t)$. Тогда все неожиданные и непонятные явления, вызывающие у человека отрицательные эмоции (страх, растерянность, изумление и др.), в рамках ЕКП приводят к росту амплитуды шума и активации ПП. Наоборот, акт решения проблемы, т.е. сведение ее к уже известной информации, сопровождается положительными эмоциями (облегчение, удовольствие и др.). В рамках нашей модели это соответствует уменьшению амплитуды шума и активации ЛП. Таким образом, гипотеза выглядит вполне правдоподобной.

Подчеркнем, что такая концепция *не* предполагает, что эмоции сконцентрированы в ПП. Мы полагаем, что шум (сосредоточенный действительно в ПП) является ***связующим звеном*** между «химическим» источником эмоций (расположенным вне неокортекса) и когнитивной активностью *обеих* подсистем.

Отметим, что такой подход дает ответ на вопрос о том, почему при очень широком спектре эмоциональных состояний все эмоции можно разделить на положительные и отрицательные. Действительно, математически любая производная может иметь знак либо плюс, либо минус, причем математический смысл здесь находится в полном «обратном» соответствии с психологическим. При этом сама величина производной может быть любой, от нуля до бесконечности, что можно соотнести с силой и характером эмоций.

Подчеркнем, что такая интерпретация возможна только благодаря особенностям ЕКП, а именно:

- разделению всей системы на две подсистемы, одна из которых ответственна за генерацию новой информации, другая – за обработку хорошо известной;
- учету случайного элемента (шума), который в рамках ЕКП трактуется не как «досадная и неизбежная помеха», а как полноправный член всех когнитивных процессов. Именно шум гарантирует индивидуальность искусственной системы.

Кроме того, амплитуда шума в предлагаемой архитектуре наиболее близко подходит для оценки «психологического» состояния всей системы. При этом величина $Z(t)$ действует на каждый нейрон и непосредственно связана с уровнем нейромедиаторов. Следовательно, она представляет собой *мост* между нейрофизиологическим и психологическим подходами к эмоциям.

Таким образом, предложенный подход к интерпретации эмоций в искусственной когнитивной системе открывает широкие возможности для исследования, анализа и интерпретации.

Литература

1. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.* Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Часть II : Понятия «образ» и «символ» как инструменты моделирования процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Сложные Системы. 2012. № 2. С. 47–67.
2. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.* О подходе к моделированию мышления с позиций динамической теории информации // Подходы к моделированию мышления / под ред. В.Г. Редько. М. : УРСС, 2014, С. 29–88.
3. *Chernavskaya O.D., Chernavskii D.S., Karp V.P., Nikitin A.P., Shchepetov D.S.* An architecture of thinking system within the Dynamical Theory of Information // Biologically Inspired Cognitive Architecture (BICA). 2013. V. 6. P. 147–158.
4. *Шамис А.С.* Пути моделирования мышления. М. : КомКнига, 2006.
5. *Яхно В.Г.* Проблемы на пути конструирования симулятора живых систем // Труды конф. «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». Н. Новгород, 2011. С. 246–249.
6. *Samsonovich A.* Emotional biologically inspired cognitive architecture // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2013. V. 6. P. 109–125.
7. *Рабинович М.И., Мюезинглу М.К.* Нелинейная динамика мозга: эмоции и интеллектуальная деятельность // УФН. 2010. Т. 180, вып. 4. С. 371–387.
8. *Koziol L.F., Budding D.E.* Subcortical Structures and Cognition. Implicationsfor // Neurophysiological Assessment. Springer, 2009.
9. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация : динамическая теория информации. М. : УРСС, 2004. С. 287.
10. *Кастлер Г.* Возникновение биологической организации. М. : Мир, 1967.
11. Основы психофизиологии / под ред. Александрова Ю.И. М. : ИнфраМ, 1998.
12. *Deacon T.W.* The Symbolic Species: The Co-Evolution of Language and the Brain. N.Y. : Norton, 1997.
13. *Шумский С.А.* Моделирование процесса обучения языку // Труды конф. «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». Н. Новгород, 2013. С. 202–203.
14. *Bianki V.L.* Parallel and sequential information processing in animals as a function of different hemispheres // Neuroscience and Behavioral Physiology. 1984. V. 14, № 6. P. 497–501.
15. *Голдберг Э.* Парадокс мудрости. М. : УРСС, 2005. С. 380.
16. *Hebb D.O.* The organization of behavior: a neuropsychological theory. N. Y., 2002. P. 457.
17. *Hopfield J.J.* Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // PNAS. 1982. V. 79. P. 2554.
18. *Chernavskaya O.D., Chernavskii D.S., Karp V.P., Nikitin A.P., Shchepetov D.S, Rozhylo Ya.A.* An architecture of the cognitive system with account for emotional component // Biologically Inspired Cognitive Architecture (BICA). 2015. V. 12. P. 144–154.
19. *Парин С.Б.* Алгоритмы обработки физиологических сигналов в экстремальных состояниях // Труды XV Международн. конф. ICNC. Ростов-на-Дону : Издательство ЮФУ, 2009. С. 224–227.
20. *Parin S.B., Tsverlov A.V., Yakhno V.G.* Models of neurochemistry mechanism of stress and shock based on neuron-like network // Proc. of Int. S. “Topical Problems of Biotonics”. 2007. P. 245–246.

Естественно-конструктивистский подход к моделированию мышления: сопоставление с другими подходами и экспериментом

Д.С. Чернавский[1], О.Д. Чернавская[1], В.П. Карп[2], А.П. Никитин[3]

[1]Физический институт РАН, Москва
[2]Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники
[3]Институт общей физики РАН, Москва

Введение

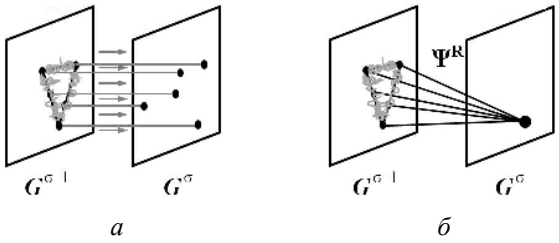
Подходы к моделированию мышления в современной когнитивной науке весьма разнообразны (см., например, [1–5]). Системы, имитирующие мышление, создаются, как правило, для того, чтобы решать определенные задачи *лучше* человека. Однако специальный интерес представляют когнитивные системы, основанные на тех же принципах организации, что и мышление человека.

В наших работах [6–9] мы используем «естественно-конструктивистский» подход (ЕКП), базирующийся на теории распознавания, нейрокомпьютинге (на основе концепции *динамического* формального нейрона), и динамической теории информации (ДТИ, см. [10]). Конечной целью наших исследований является математическая модель искусственной системы, которая была бы способна выполнять функции мыслительного процесса. Выделим ряд ключевых моментов ЕКП:

- использование континуальных представлений нейропроцессоров;
- разделение всей системы на две подсистемы – для генерации и рецепции информации. Условно эти подсистемы можно соотнести с правым и левым церебральными полушариями (ПП и ЛП), а связи между ними $\Lambda(t)$ – с *corpus callosum.* ПП отвечает за обработку *новой* информации, а ЛП – за работу с хорошо известной, что полностью согласуется с выводами Э. Голдберга [11];
- учет случайного фактора («шума»), который присутствует только в ПП в виде слагаемого $Z(t)\xi(t)$ в уравнениях для нейронов (Z – амплитуда, ξ – случайная функция);
- *неустойчивый* характер процесса формирования символа, в результате чего результат оказывается *непредсказуемым*; этот фактор обеспечивает *индивидуальность* искусственной когнитивной системы;
- самоорганизация нейронного ансамбля вместо детерминированной программы.

Архитектура искусственной когнитивной системы, основанной на ДТИ

В наших работах [8, 9] была представлена модель искусственной мыслительной системы, основанной на этих принципах. Самоорганизация основывалась на принципе «почернения» (усиления) связей в ПП вплоть до некоторого порогового значения, после чего результат обучения должен передаваться из ПП в ЛП.



а *б*

Рис. 1. Блок формирования символа образа

На рис. 1 представлена иллюстрация к процессу формирования символа типичного образа. Образ с пластины предыдущего уровня ($\sigma - 1$) передается на последующую пластину G^{σ} (рис. 1, *а*), где, благодаря нелинейному конкурентному взаимодействию, выбирается только один нейрон, который и становится символом данного образа (рис. 1, *б*). Все межпластинные связи перезамыкаются на нейрон-символ, тем самым реализуется концепция «победитель получает все», как в [12].

В результате множественного повторения описанного акта на разных уровнях формирования системы мы получаем следующую схему искусственной когнитивной системы (рис. 2).

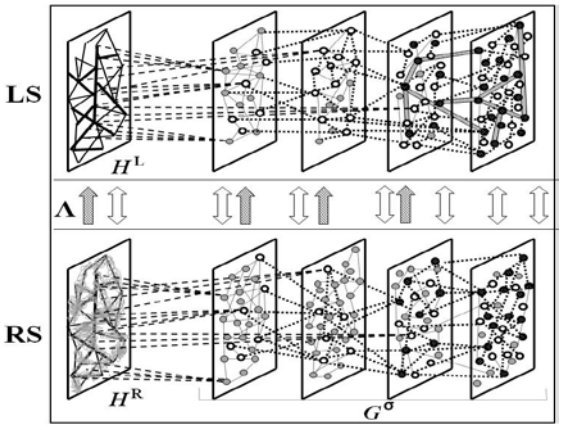


Рис. 2. Схематическое представление архитектуры искусственной когнитивной системы

На рисунке представлена схема искусственной когнитивной системы. Она состоит из двух подсистем, ПП и ЛП, причем первая с необходимостью содержит случайный фактор (шум). Каждая подсистема имеет набор пластин (процессоров) разного уровня иерархии, где нижний уровень $\sigma = 0$ соответствует образным пластинам хопфилдовского типа [13]. Вся символьная инфраструктура $\{G^{\sigma}\}$ построена из блоков, представленных

на рис. 1. Вся система «растет»: образы на нижнем уровне (пластины хопфилдовского типа H^0 в ПП и H^{typ}) формируют символы типичного образа на следующем уровне G^1. Группа символов, связи между которыми усиливаются по правилу Хебба, составляет «образ из символов» и формирует свой символ на следующем уровне G^2 и т.д. Отметим особую роль пластины H^0: она содержит ***всю*** образную информацию, воспринимаемую системой, даже если связи нейронов, составляющих данный образ, *слабые.* Поэтому данная пластина называется еще «размытое множество».

Данная система способна обучаться и после этого выполнять следующие функции мышления: распознавание, прогноз событий (по прецедентам), восприятие речи (сенсорика символов на высоких иерархических уровнях) и принятие решений. Последнее возможно:

– при наличии необходимой информации (логическое мышление);

– при недостатке информации (интуитивное мышление);

– при наличии *противоречивой* информации (разрешение парадоксов, т.е. творческое мышление).

Сопоставление с другими подходами

Анатомические данные

Согласно экспериментальным данным [14], кора головного мозга представляет собой один слой, состоящий из *колонок*, расположенных вертикально к поверхности. Кора разделена на участки, отличающиеся функционально. Колонка возбуждается (или гаснет) целиком, т.е. ведет себя как формальный нейрон. Колонка состоит из шести тонких слоев, отличающихся морфологически.

В рамках ЕКП эти данные можно интерпретировать следующим образом. Нейропроцессоры (и связи между ними) расположены параллельно поверхности. Иерархия блоков соответствует расположению участков от затылочного отдела (низший уровень) до лобной части (высшие уровни).

Формальному нейрону в ЕКП соответствует колонка. Роль слоев колонки в ЕКП не обсуждалась. Возможная интерпретация: слои колонки выполняют функцию проверки и подтверждения поступающего сигнала, подобно пластинам Рекседа в спинном мозге (их роль подробно обсуждалась в [15]). Тогда колонка должна возбуждаться при поступлении двух (или более) сигналов, из которых второй подтверждает (или дополняет) первый. Это свойство биологически оправданно, поскольку обеспечивает «ответственность» колонки за свое поведение. Случайный, т.е. не подтвержденный, сигнал не возбуждает колонку. Это свойство может играть роль при декомпозиции символов на высоких уровнях иерархии (аналогичным свойством обладает иммунная система).

Теория графов

В подходе, основанном на теории графов, принимается, что формальный нейрон есть узел графа, связи – ребра графа [16]. Формулируются свойства сигналов, распространяющихся по ребрам. Известны сетевая топология графа и иерархическая, типа дерева. Теория графов позволяет систематизировать эмпирические данные.

В рамках ЕКП мыслительной системе соответствует граф следующей структуры. В общем графе выделены автономные области (блоки), внутри которых узлы и ребра образуют сеть. Совокупность блоков образует граф, в котором узлы – блоки и ребра – связи. Такой граф имеет топологию типа дерева, что необходимо в иерархической системе. Такая структура не противоречит теории графов, но уточняет ее применительно к проблеме мышления.

Когнитом

Понятие когнитома как системы реализованных степеней свободы введено К.В. Анохиным [17]. «Ког» есть блок, состоящий из двух «гиперплоскостей». На одной имеется образ (набор нейронов), на другой – соответствующий ему «особый элемент». Последний может рассматриваться как «нейрон», но отличающийся от нейронов образа морфологически, биохимически и генетически. «Когнитом» есть иерархически организованный набор «когов», способный решать задачи мышления. Уровни иерархии соответствуют сложности (и содержательности) решаемых задач.

С точки зрения ЕКП «когнитом» отличается от нашей архитектуры когнитивной системы лишь терминологически, они согласуются, если отождествить понятия: «ког» = «блок формирования символа образа», «гиперплоскость» = нейропроцессор (пластина), «особый элемент» = «символ», «когнитом» = вся конструкция аппарата мышления. Отличия нейронов образа от нейрона символа (морфологические и т.д.) в ЕКП не рассматриваются, но вполне допускаются. Таким образом, эти подходы не противоречат, а дополняют друг друга.

Возможности экспериментальной проверки

В последнее время экспериментальная техника, позволяющая детектировать активность различных участков головного мозга, бурно развивается. Показано, что при приобретении *нового* опыта определенные участки мозга подопытного животного изменяются морфологически и генетически, причем эти участки индивидуальны [18]. Однако *инвазивные* методы (вживление электродов в мозг), широко применяемые в опытах на мышах и других млекопитающих, по отношению к людям невозможны.

Неинвазивные методы «картографии» мозга (магнитно-резонансная томография, МРТ, в сочетании с детекцией кровотока и электроэнцефалографией, ЭЭГ, – см. [19]) также развиваются весьма интенсивно. Весьма интересные результаты дал эксперимент по поиску так называемых *зеркальных нейронов*. Было показано, что при разных проявлениях когнитивной деятельности (*думать, вспомнить, вообразить*) активизируются разные зоны

головного мозга. Однако если речь идет об одном и том же процессе, некоторые участки активизируются во всех трех случаях. Именно они и были названы «зеркальными» нейронами, поскольку *отражали* сам процесс, а не способ его обработки.

В рамках ЕКП мы можем предложить идею эксперимента, направленного на детекцию *творческого* когнитивного процесса. В качестве «подопытного» приглашается человек творческий с высоким уровнем интеллекта. Ему предлагается сформулировать задачу, одну из тех, которые он должен решить в рамках своей деятельности. Предлагать задачу извне не целесообразно, поскольку решение ее безответственно. На основе ЕКП можно предсказать динамику возбуждений участков коры головного мозга «подопытного» в течение решения задачи.

На первом этапе возбуждаются лобные участки (преимущественно левого полушария). Это – попытка решить задачу «логически».

Второй этап: возбуждаются затылочные части (преимущественно правого полушария). Это – попытка решить задачу «интуитивно», на основе прецедентов. Этот этап наступает, если задача логически не решается.

Третий этап: возбуждаются затылочные зоны ПП – попытка решить задачу на основе редких прецедентов, хранящихся в «размытом множестве». Этап наступает, если первые два оканчиваются неудачно.

Четвертый этап: квазихаотическое (в пространстве и времени) возбуждение как лобных, так и затылочных участков. Этот этап соответствует состоянию «муки творчества» перед принятием решения («озарением»).

Пятый этап: ярко вспыхивает вся кора головного мозга. Это значит, что решение принято и сформулировано на общепринятом языке (т.е. настало «озарение»).

В этом сценарии важны крупномасштабные возбуждения. При детализации сценария (мелкомасштабная визуализация) должна проявиться индивидуальность мышления.

Подтверждение (или опровержение) этого сценария является круциальным экспериментом проверки ЕКП. Современное допустимое разрешение не позволяет детектировать активность одного нейрона (что представляется наиболее интересным), однако локализовать активность в малой области, соответствующей участку одного процессора, вполне возможно.

Таким образом, мы можем заключить, что схема искусственной когнитивной системы, полученной в рамках ЕКП, не противоречит другим рассмотренным подходам, но в определенном смысле дополняет их. Предложенный эксперимент, если он будет произведен, может подтвердить (или опровергнуть) правомерность выводов ЕКП.

Литература

1. *Шамис А.С.* Пути моделирования мышления. М. : КомКнига, 2006.

2. *Жданов А.А.* Автономный искусственный интеллект. М. : Бином. Лаборатория знаний, 2008. 359 с. (Адаптивные и интеллектуальные системы). ISBN 978-5-94774-730-0.

3. *Laird J.E.* The Soar Cognitive Architecture. MIT Press, 2012.

4. *Станкевич Л.А.* Моделирование когнитивных функций навигационного поведения в интеллектуальной системе робота // Труды 3-й конф. «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». Н. Новгород, 2013. С. 159–161.

5. *Koziol L.F., Budding D.E.* Subcortical Structures and Cognition : Implications for Neurophysiological Assessment. Springer, 2009. 405 p.

6. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.* Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Часть II : Понятия «образ» и «символ» как инструменты моделирования процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Сложные системы. 2012. № 2. С. 47–67.

7. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С.* О математических моделях нейропроцессоров // Материалы конференции «Нелинейная динамика в прикладных исследованиях». Н. Новгород, 2013. С. 192–195.

8. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.* О подходе к моделированию мышления с позиций динамической теории информации // Подходы к моделированию мышления / под ред. В.Г. Редько. М. : УРСС, 2014. С. 29–88.

9. *Chernavskaya O.D., Chernavskii D.S., Karp V.P., Nikitin A.P., Shchepetov D.S.* An architecture of thinking system within the Dynamical Theory of Information // BICA Journal. 2013. V. 6. P. 147–158.

10. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация : динамическая теория информации. М. : УРСС, 2004. С. 287.

11. *Голдберг Э.* Парадокс мудрости. М. УРСС, 2005. С. 380.

12. *Kohonen T.* Self-Organizing Maps. Springer, 2001.

13. *Hopfield J.J.* Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // PNAS. 1982. V. 79. P. 2554.

14. *Muncastle V.* The columnar organization of necrtex // Drain. 1997. V. 12. P. 7–722.

15. Распознавание. Аутодиагностика. Мышление / под ред. Д.С. Чернавского. М. : Радиотехника, 2004.

16. *Кузнецов О.П.* Псевдооптические нейронные сети – голографический подход к информатике мозга // Подходы к моделированию мышления / под ред. В.Г. Редько. М. : УРСС, 2014. С. 305–347.

17. *Анохин К.В.* Когнитом: гиперсетевая модель мозга // Труды 5-й Межд. конф. по когнитивной науке. Калининград, 2012.

18. *Доронина-Амитонова Л.В., Федотов И.В., Федотов А.Б., Анохин К.В., Желтиков А.М.* Нейрофотоника: оптические методы исследования и управления мозгом // УФН. 2015. Т. 185, № 4. С. 371–392.

19. *Verkhlyutov V.M., Ushakov V.L., Sokolov P.F., Velichkovsky B.M.* Large-scale analysis of imagination reveals extended but limited top-down components in human visual cognition // Psychology. 2014. V. 7, № 4. P. 4–19.

Интерпретация контекста как характеристика нелинейности структуры ментальной грамматики: экспериментальное исследование референции

Т.В. Черниговская, В.К. Прокопеня

Санкт-Петербургский государственный университет

Референция как соотнесение языковых выражений с объектами или событиями действительности, в широком смысле, и как соотнесение одних языковых выражений с другими, упомянутыми ранее, в узком смысле, является одним из основных свойств любого естественного языка, так как обеспечивает связность дискурса [1, 2]. Успешность установления референциальных отношений между единицами языка, например между именными группами и местоимениями, обеспечивает успешность коммуникации в целом. Изучение механизмов референции важно как для понимания устройства системы языка (ментальной грамматики), так и для моделирования автоматических систем синтеза и распознавания речи, способных осуществлять адекватную коммуникацию в виртуальной среде.

В последние десятилетия был предпринят ряд попыток создания общей теории местоименной референцией, обладающей достаточной предсказательной силой. Среди наиболее известных можно назвать Centering Theory [3], Accessibility Theory [4, 5], Expectancy Hypothesis [6], когнитивный квантитативный подход А.А. Кибрика [7]. Все модели, так или иначе, основаны на ранжировании факторов, влияющих на референцию, однако из-за противоречивости получаемых экспериментальных данных принципы ранжирования до сих пор до конца не определены. Дело в том, что факторы чаще всего изучаются изолированно друг от друга, поэтому выяснить, какой из них приоритетен, оказывают ли они взаимное влияние друг на друга и т.д., представляется сложным.

В 2008 году Келер предложил использовать формулу Байеса для расчета вероятности интерпретации местоимений в пользу того или иного референта [8]. Основной принцип подхода базируется на том, что интерпретация местоимений зависит от двух параметров: ожидания адресата, что повествование будет продолжено о том же референте, и вероятности того, что вместо этого референта может быть употреблено местоимение. Подобные вероятности высчитываются для каждого из референтов, к которым потенциально может быть отнесено местоимение, и «выигрывает» тот, который набирает наивысший балл.

Модель была протестирована на данных, полученных в ходе ряда экспериментов, и продемонстрировала высокий уровень надежности [9]. Однако при попытке использования предложенной математической формулы в качестве предсказательной модели мы вновь сталкиваемся с проблемой определения факторов, влияющих на референцию и выбор референциального средства, на основании которых можно было бы рассчитать коэффициенты вероятности.

В данном исследовании мы объединили несколько методик, чтобы выявить роль основных факторов в процессе разрешения референции: семантические свойства предложения, информационная и синтаксическая структура предложения. Воспользовавшись преимуществом русского языка как языка с богатой морфологией и свободным порядком слов, мы получили возможность отдельно изучить влияние синтаксической и информационной структуры предложения (что невозможно сделать, например, на материале английского языка, а большинство исследований использует именно эти языковые данные). На материале русского языка имеется ряд экспериментальных исследований, посвященных различным аспектам референции [10–12].

Эксперимент 1

В первом эксперименте испытуемым предлагалось прочитать предложение, содержащее упоминание двух разнополых (чтобы избежать ситуации потенциальной неоднозначности) референтов и написать продолжение истории таким образом, чтобы два предложения (стимул и ответ) составляли связный текст. Применение данной методики позволяет изучить сразу два вопроса: 1) какие факторы влияют на ожидание адресатом того, какой референт будет обсуждаться в дальнейшем повествовании; 2) какие факторы влияют на выбор говорящим референциального выражения (полной именной группы или местоимения).

В качестве стимульных было отобрано 14 предложений с глаголами, обладающими семантическим свойством имплицитной каузальности (IC-verbs) с подлежащим в роли стимула (*испугать, возмущать, радовать* и т.п.), и 14 обычных глаголов (V-verbs). Для проверки влияния синтаксической и информационной структуры каждый стимул был представлен в двух вариантах – с прямым (SVO) и обратным (OVS) порядком слов:

IC-SVO – *Молодая поэтесса искренне восхищала либерального издателя.*

IC-OVS – *Либерального издателя искренне восхищала молодая поэтесса.*

V-SVO – *Любящий отец на ночь всегда гладил по голове маленькую дочку.*

V-OVS – *Маленькую дочку на ночь всегда гладил по голове любящий отец.*

Кроме того, в эксперименте использовалось 53 предложения-филлера, отвлекающих внимание испытуемых от настоящей цели эксперимента.

Филлерами выступили простые предложения с одним одушевленным референтом либо безличные предложения. Каждый испытуемый видел стимул только в одном из условий (SVO или OVS), для чего было составлено два экспериментальных листа. В эксперименте приняли участие 66 взрослых носителей русского языка.

Всего было получено 1848 ответов, из которых были исключены все предложения, не соответствующие целям эксперимента (продолжения про ситуацию в целом, про обоих референтов и продолжения-реакции), после чего осталось 954 значимых ответа. Анализ результатов показал, что тип глагола (IC/V) значимо влияет на выбор референта для продолжения (χ^2 = 85,529, p < 0,001). В подавляющем большинстве предложений с IC-глаголами продолжение описывало референт-стимул, выступающий в позиции подлежащего. При этом условие порядка следования референтов никакого влияния на этот выбор не оказывало (χ^2 = 0,006, p = 0,939). В предложениях же с обычными V-глаголами выбор референта для продолжения зависит от условия (χ^2 = 6,756, p = 0,009): при прямом порядке слов (SVO) предпочтительным референтом для продолжения является упоминающееся вторым дополнение (68,30 %); в условии с обратным порядком слов (OVS) никакого значимого предпочтения референта нет (распределение ответов – 44,19 % vs 55,81 %; биноминальный критерий: p = 0,101).

Полученные результаты говорят об отсутствии влияния синтаксической роли референта на референцию (т.е. на выбор референта для продолжения) и о наличии влияния позиции референта в информационной структуре предложения. Так как русский язык является конечноударным, то в соответствии с правилами *Silent prosody* [13] предложения с базовым порядком слов SVO будут прочитаны с главным фразовым ударением на последнем слове, а значит, их информационная структура будет восприниматься как *тема – рема*, следовательно, ударное дополнение будет ремой. Таким образом, наши результаты говорят о том, что в ходе развертывания дискурса рема предыдущего высказывания становится темой следующего. В стимулах с обратным порядком слов (OVS) оказалось невозможным однозначно определить информационную структуру из-за неестественности предложений с обратным порядком слов, употребленным в нулевом контексте.

Что касается факторов, обуславливающих выбор референциального средства, то мы не обнаружили влияния ни типа глагола (χ^2 = 0,869, p = = 0,318), ни порядка слов (χ^2 = 0,113, p = 0,736). В то же время подтвердилось, что роль референта в синтаксической структуре предложения в значительной степени определяет референциальный выбор: подлежащее чаще заменяется редуцированным референциальным средством (местоимением или эллипсисом), чем дополнение.

Таким образом, в результате первого эксперимента было выявлено, что семантические факторы и информационная структура предложения влияют только на ожидание адресата, о каком из референтов будет продолжение, и синтаксические роли определяют исключительно вероятность употребления редуцированных референциальных средств.

Эксперимент 2

На следующем этапе мы объединили методику анкетирования с непосредственной методикой регистрации движений глаз, чтобы исследовать механизмы интерпретации местоимений в ситуации референциальной неоднозначности, т.е. когда местоимение может быть отнесено с равной вероятностью к двум и более референтам. При этом стимульный материал был подобран таким образом, чтобы не было никаких контекстных, семантических или лексико-грамматических подсказок, и испытуемые должны были интерпретировать местоимения, опираясь исключительно на структуру предложения. В качестве стимулов были предложены 18 отрывков дискурса, состоящих из двух предложений: в первом вводилось два референта одного пола, во втором – местоимение, которое по смыслу могло относиться к любому из референтов. Каждый стимул был представлен в трех условиях: с двумя вариантами порядка слов без изменения порядка следования референтов и в однозначном контексте (с разнополыми референтами):

SVO – *Молодая девушка очень испугалась за больную тетю. Вчера ночью она два раза вызывала скорую помощь.*

OVS – *Молодую девушку очень испугала больная тетя. Вчера ночью она два раза вызывала скорую помощь.*

Контроль – *Молодая девушка очень испугалась за больного дядю. Вчера ночью она два раза вызывала скорую помощь.*

Таким образом, было составлено три протокола, состоящих из 18 стимулов, по 6 в каждом условии, и 54 филлеров. Задачей испытуемых было прочесть отрывок, а затем продолжить предложение, относящееся к прочитанному тексту (напр.: *Скорую вчера вызывала…*). В течение всего эксперимента велась запись движений глаз испытуемых с помощью системы EyeLink 1000 Plus в режиме со свободным положением головы, что позволяет создать максимально естественные условия чтения и повышает экологичность эксперимента. При таком методе испытуемый находится на расстоянии 60–80 см от экрана компьютера и просто читает предъявляемый текст. Допустимый диапазон движений головой составляет 22 × 18 × 20 см, что обеспечивает точность измерений 0,5º. Мы анализировали характеристики движений глаз при чтении отдельных фрагментов, называемых областями интересов (*Interest Area*): область подлежащего (напр., *молодая девушка*), область дополнения (напр., *за больную тетю*) и все второе предложение, содержащее местоимение (напр., *Вчера ночью она два раза вызывала скорую помощь*). При этом нас интересовали следующие параметры: общее

время прочтения области интересов (сумма всех фиксаций в данной области), количество возвратов из выбранной области интересов к предыдущему тексту (*Regression Out*), количество возвратов в выбранную область интересов (*Regression In*), общее количество прочтений области интересов (*Run Count*). Также отдельно в протоколе экспериментатора фиксировались устные ответы испытуемых на контрольные вопросы.

Всего в эксперименте приняло участие 36 взрослых носителей русского языка.

Анализ характеристик движений глаз не выявил замедления при прочтении второго предложения (содержащего местоимение) в неоднозначных контекстах. Однако было обнаружено заметно большее количество возвратов к предыдущему тексту в неоднозначных контекстах по сравнению с однозначным (критерий Манна – Уитни: U = = 31865,500; Z = –2,585, p = 0,010). При этом различий между неоднозначными условиями (SVO/OVS) не оказалось. Кроме того, было зафиксировано значимо большее количество возвратов к первому упомянутому референту по сравнению со вторым (U = 117503,500; Z = –9,996; p < 0,001). Это могло бы говорить о предпочтении первого референта в качестве антецедента местоимения, по крайне мере, на первоначальном этапе обработки информации, однако отсутствие разницы в общем количестве прочтений первого и второго референтов (p = 0,141) свидетельствует в пользу того, что носители языка, столкнувшись с неоднозначностью, предпочитают вернуться к началу предложения и перечитать его целиком, прежде чем принять решение о выборе референта.

Анализ ответов, данных испытуемыми, показал, что условие (SVO/OVS) имеет значение. Стоит отметить, что на этот раз мы составили стимулы таким образом, чтобы они воспринимались носителями языка естественно при обоих вариантах порядка слов. Результаты показали, что при обратном порядке слов (OVS) испытуемые значимо чаще относят местоимение к подлежащему, находящемуся в позиции ремы, тогда как в условии SVO ответы распределились 50/50. Эти данные полностью подтверждают предложенную Э. Келером модель: при интерпретации местоимения в OVS испытуемый скорее ожидает продолжения про второго референта, находящегося в позиции ремы, и в то же время велика вероятность употребления местоимения вместо референта в роли подлежащего; с другой стороны, в SVO велико ожидание продолжения про находящееся в фокусе дополнение при низкой вероятности употребления вместо него местоимения (ср.: для референта в роли подлежащего в позиции темы картина будет обратной – низкое ожидание продолжения о нем при высокой вероятности прономинализации). Отсюда – равное распределение ответов.

Таким образом, в результате экспериментального исследования получены свидетельства в пользу модели референции Э. Келера. Установлено, что в процессе интерпретации местоимений на ожидания носителя языка, какой референт будет упомянут далее в дискурсе, оказывают влияние семантика и информационная структура, а на его предположение, что именно этот референт будет выражен редуцированным референциальным средством (местоимением или нулем), – роль референта в синтаксической структуре (правило приоритета подлежащего). Предсказательная сила контекста является многофакторной и нелинейной структурой, использующей разноуровневые языковые средства для обеспечения адекватной интерпретации событий – не только универсальные, но и специфичные для разных языков инструменты [14].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ (№ 14-04-00586).

Литература

1. *Падучева Е.В.* Высказывание и его соотнесенность с действительностью. М. : Наука, 1985. 272 с.

2. *Падучева Е.В.* Статьи разных лет. М. : Языки славянской культуры, 2009. 736 с.

3. *Grosz B.J., Joshi A.K., Weinstein S.* Centering: A framework for modeling the local coherence of discourse // Computational Linguistics. 1995. V. 21. P. 203–225.

4. *Ariel M.* Accessibility theory: An overview // Text representation: Linguistic and psycholinguistic aspects / T.J.M. Sanders, J. Schilperoord, W. Spooren (eds.). Amsterdam : John Benjamins, 2001. V. 8. P. 29–87.

5. *Ariel M.* Accessibility marking: Discourse functions, discourse profiles, and processing cues // Discourse Processes: Accessibility in text and discourse. 2004. V. 37, № 2. P. 91–11.

6. *Arnold J.E.* The effects of thematic roles on pronoun use and frequency of reference // Discourse Processes. 2001. V. 31. P. 137–162.

7. *Kibrik A.A.* Reference in discourse. Oxford : Oxford University Press, 2011. 688 p.

8. *Kehler A., Kertz L., Rohde H., Elman J.* Coherence and Coreference Revisited // Journal of Semantics : Special Issue on Processing Meaning. 2008. V. 25, № 1. P. 1–44.

9. *Rohde H., Kehler A.* Grammatical and Information-Structural Influences on Pronoun Production // Language, Cognition, and Neuroscience. 2014. V. 29, № 8. P. 912–927.

10. *Прокопеня В.К., Храковская М.Г., Черниговская Т.В.* Некоторые факты взаимосвязи процессов усвоения и утраты языка. Экспериментальное исследование анафорических отношений местоимений в русском языке // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 9: Филология. Востоковедение. Журналистика. 2008. № 1–4. С. 82–97.

11. *Prokopenya V., Khrakovskaya M., Chernigovskaya T.* Reference assignment by Russian aphasic speakers with agrammatism // The 11th International Symposium of Psycholinguistics, Tenerife, 20–23 March 2013.

12. *Федорова О.В.* Экспериментальный анализ дискурса. М. : Языки славянской культуры, 2014. 512 с.

13. *Fodor J.D.* Prosodic disambiguation in silent reading // Proceedings of the North East Linguistic Society 32. GSLA, University of Massachusetts, 2002.

14. *Черниговская Т.В.* Язык как интерфейс между сознанием и мозгом // Сб. научных трудов «Проблема сознания в междисциплинарной перспективе». М. : Институт философии РАН, 2013. С. 76–90.

К математическим основам памяти живых систем

М.Я. Эйнгорин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
НИИОКП «СКИТ», Нижний Новгород
skit@vmk.unn.ru, 8(904) 049-49-56

Живая природа на планете Земля появилась около трех миллиардов лет назад. Точнее, по данным ученых, это произошло около 3,8 миллиарда лет назад [1]. Недавно английскими исследователями найден в Антарктике самый старый сперматозоид растений с соответствующими генетическими структурами, имеющими возраст не менее 400 миллионов лет. Генетические структуры этого сперматозоида, несомненно, подчиняться всем законам математики генов. В настоящее время исследователи живой природы используют в своих работах по анализу природы, процессов в живом и для описания их структур «с-математику» – наши, современные, математические методы, которым около одной тысячи лет. Очевидно, что математические основы «с-математики» не обязаны совпадать с математикой природы. На сегодня таких современных математических исследований достаточно много, каждое из них приводит к определенным положительным результатам. Встречаются исследования, не соответствующие реальным биологическим структурам живого.

В работе [2] автора настоящих тезисов показано, что генетические структуры живого построены по строгим физическим, химическим и, что для нас наиболее важно, строгим математическим теориям, но… миллиардолетней давности, или «мд-математике». Именно этой тонкости не поняли практически все ученые, занимающиеся математикой живых систем. Они сочли, что с-математика обязана описывать структуры живых систем. Такой подход чаще всего не дает адекватного описания грамматик синтеза генов и структур живого.

В работе и, соответственно, в докладе показана часть математического аппарата мд-математики и восстановленная на ее основе часть грамматик синтеза генетических структур живого. Первые публикации автора по данному направлению относятся к 1967–2001 годам [3] с последующим развитием в публикациях до выхода монографии [2] в 2014 году. Практически все публикации даны в литературе к [2].

В [2] приведены отдельные необходимые результаты развития и построения комбинаторных N-мерных (по нашей терминологии – Латинских) позиционных структур с числом различных элементов K независимо от мерности пространства N. На базе последних строятся соответствующие им варианты графических позиционных структур. Определяется число возможных структур в зависимости от K и N. В N-мерных графических структурах по каждому из его N направлений могут откладываться K переменных любой природы и с любыми связями между ними. Рассматриваются свойства Латинских и графических структур. Показано, что любые из N графических линейных или нелинейных структур однозначно определяют любую точку N-мерного пространства. На базе последних строится широкий спектр позиционных многозначных логик с широким представлением возможных инверсий, в том числе для слоев параметров переменных. Каждой группе инверсий соответствует своя многозначная логика. В отличие от «нашей» логики, логики позиционны, в них операции преобразований «с-логик» могут совершаться только над переменными совпадающих позиций. Особо отмечен принцип неопределенности логик, который играет значительную роль при построении структур генов и их восстановлении при нарушениях.

На базе многозначной логики рассматриваются логические равенства – соответствия переменных, параметров и констант с возможностью их моделирования на элементах произвольной, но согласованной физико-химической природы и возможных «технологиях», отличных от тех, на базе которых это реализовано в живой природе на нашей планете.

Развиваются (восстанавливаются) принципы **математической симметрии**, которые широко используются Природой для допустимой изменчивости, структурного деления генов, их «точек» и «запятых», анализа, коррекции и восстановления генов после ограниченных сбоев.

В докладе и работах автора в основном рассматриваются (восстанавливаются) основные **структуры природных грамматик** синтеза мРНК, в связи с чем для нуклеотидов и кодонов, их параметров вводятся **инверсные взаимосвязи** на базе многозначной позиционной логики. Устанавливается **порядок** и характер взаимосвязи нуклеотидов, в результате чего на основе кодона строится базовая структура синтеза мРНК, или трехмерная графическая структура – **кодонограмма**, связывающая нуклеотиды и кодоны, их параметры в единую конструкцию. В структуре кодонограммы параметры распределены равномерно по трем линейным направлениям, а **суммы масс** – группами по четырем кодонам на базе логических равенств соответствия (на базе элементарных нелинейных кодоновых групп) кодонограммы. Это одна из базовых грамматических структур молекулярной биологии.

Показана искусственная структура нуклеотидов, их взаимосвязь с двоичным кодированием, четкая взаимосвязь параметров нуклеотидов по водородным и пурин-пиримидиновым связям со структурой их масс. Показан минимальный структурный **квант массы** построений в молекулярной биологии. Выделены и представлены другие константы.

Вводятся таблицы систематизации 20 аминокислот по их основным параметрам. В таблицах систематизации вводятся четыре **нейтральные** аминокислоты в разрезе гидрофобных – гидрофильных аминокислот.

На базе кодонограммы строятся структуры **аминограмм** всех известных на сегодня 17 (16) диалектов путем установления соответствия кодонов кодонограммы аминокислотам (покрытие кодонов аминокислотами по диалектам). В результате получаем структуры, однотипные аминокислоты которых и их параметры расположены вдоль оси X_3 структур. Такие основные параметры аминокислот, как их полярность и гидрофобность, в аминограммах диалектов структурированы в плоскости X_1X_2 вдоль оси X_3.

Из 20 покрывающих аминограммы аминокислот десять вдоль оси X_3 совпадают для всех известных 16 диалектов. Они образуют **базовые** аминокислоты, не подвергающиеся коррекции при дальнейшей модернизации при формировании мРНК каждого из диалектов.

На базе **симметрий** двоичного представления водородных и пурин-пиримидиновых кодов кодонов строится новая структура – **массограмма**. Это плоская матрица 8×8 кодонов, состоящая из четырех подматриц 4×4. Показаны двоичные линейные структуры каждой из них по формированию и **взаимосвязям кодонов равных масс** и нелинейные графические структуры, связанные с нелинейными логическими равенствами соответствия. Суммы масс этих кодонов представляет собой **биологическую константу массы** кодонов этих равенств.

Покрытие кодонов **массограммы** аминокислотами демонстрирует четкую однотипную систематизацию **базовых** и не базовых аминокислот в каждой из четырех ее матриц 4×4 (над не главной диагональю матриц и под ней), систематизацию их строк (линейных равенств – соответствия) с тремя размерами аминокислот, другое.

Показана информационная **многослойность** (или наличие **скрытых слоев** кодирования) структур мРНК [2, 3], различная для кодирующих частей, основанная на принципе неопределенности пар соседних кодонов, и предкодов и посткодов. Показаны функциональные особенности, свойства и назначения слоев мРНК.

Показан принцип **избыточности**, который в сочетании с многослойностью, симметрией и принципом неопределенности обеспечивает изменчивость, контроль и восстановление любых созданных природой генов и, как следствие, организмов на базе простейших законов, записанных в ферментах контроля мРНК, РНК и ДНК. Теория Дарвина в части изменчивости видов в результате оказывается основанной именно на избыточности в грамматиках, допускающих эту изменчивость.

В работе дано много других соотношений, в том числе в части симметрий, которые были использованы Природой для построения той части грамматик, которая изложена в работе [3].

Грамматики, разработанные Природой, – это законы, которые недоступны нам, людям, или лежат вне нашей досягаемости и определяют принципы синтеза живого. Они реализованы в программах живого или его РНК и ДНК, клетках и ферментах преобразующих их в живое.

Таким образом, в результате восстановления и использования древней «мд-математики», в том числе с учетом достижений «с-математики», удалось получить в области генетики ряд принципиально новых результатов в построениях и структурах генов.

Живая природа создана миллиарды лет назад, и часто «наши» математические методы, возраст которых не более тысячи, сотен или десятков лет, не подходят для описания ее структур или оказываются предельно громоздкими. В Природе решения более просты, эффективны и быстры. Современные ученые при своих исследованиях чаще всего этого не осознают.

Настоящие тезисы написаны для того, чтобы исследователи памяти живого могли воспользоваться опытом автора настоящих тезисов и работой [3] при исследовании грамматик построения памяти живого. Осмелюсь предположить, что это относится и к особой структуре – памяти живого. Следует также предположить, что память живого, его структуры и природные грамматики синтеза преподнесут нам, людям, достаточно много сюрпризов, как и синтез других структур и органов живого. К сожалению, мы, люди, считаем, что наши достижения в математике, физике и химии достаточны для познания законов построения живого, и мы являемся единственными в окружающем мире, первыми и последними носителями истин этих наук. К великому сожалению, следует обратить внимание очень «больших», маститых, и начинающих, «малых», ученых, что чаще всего это не так.

Наши современные математические методы достаточно хорошо развиты, но, возможно, в живой природе, и особенно в памяти, наша, современная, математика охватила не все аспекты, необходимые для описания подобных сложнейших структур. Поэтому при исследовании и построении структур памяти живых и технических систем необходимо иметь в виду возможность восстановления и использования элементов другой, миллиардолетней математики – «мд-математики». Очевидно, что часть математического аппарата из упомянутой работы будет использована для теоретического описания памяти живого, но потребуется дальнейшее развитие, точнее, восстановление.

Циклом работ автора с 2000 по 2014 годы неоспоримо доказано существование «мд-математики», физики, химии, наличие идеи создания и возможности последовательного развития жизни и разумной жизни на планете Земля, существование грамматик создания живого, ее вариаций. Это же неоспоримо доказывает существование для нас высшей, скрытой от нас цивилизации, которая создала нас, обеспечила наше существование и которую мы, люди, усиленно ищем в пространстве нашей Вселенной и других глобальных структурах.

Работа [3] может быть получена желающими по адресу, указанному в начале настоящих тезисов, и Интернету.

Литература

1. *Опарин А.И.* Жизнь, ее природа, происхождение и развитие. М. : Просвещение, 1962.

2. *Эйнгорин М.Я.* Математика и модели грамматик генетических структур живых систем : монография. Н. Новгород, 2014. 524 с.

3. *Эйнгорин М.Я.* Основы кодирования и управления в молекулярной биологии : монография. Н. Новгород : Изд-во НГМА, 2001.

Взгляд на теорию управления живыми системами

В.Г. Яхно

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
yakhno@appl.sci-nnov.ru

Решения обычно приходят
к нам оттуда, откуда мы меньше
всего предполагаем их получить,
из чего следует, что нечего пытаться
смотреть в нужном направлении,
потому что иначе оттуда
ничего не придет.

Адамс Дуглас
«Лосось сомнений», глава 5

Интерес к механизмам управления состояниями живых систем имеет многотысячелетнюю историю. На сегодняшнем уровне исследований наиболее актуальной представляется задача компактного представления объемного набора экспериментальных данных, накопленного ранее. Потребности заинтересованных исследователей в адекватном понимании механизмов управления в живой природе способствуют созданию описаний психологии «интеллектуальных систем» [1], разработке вариантов теоретических представлений о процессах в мозге [2–18]. От теории ожидается введение эффективных базисных компонент – «элементарных представлений», с помощью которых можно было бы проводить компоновку и сжатие регистрируемых данных, а также конструировать технические аналоги живых систем [12–20].

Излагаемый здесь тезисный взгляд на набор базисных моделей и определений, с помощью которых можно построить описание режимов функционирования мозговых архитектур, включая интерпретацию ряда так называемых загадок мозга, был стимулирован докладом К.В. Анохина [2], в котором я увидел элементы сомнений в возможности выполнения такой работы на нынешнем уровне знаний о поведении сложных систем – «суперсистем» [1–20].

Методология описания. В физическом подходе обычно можно выделить три основных взаимосвязанных этапа: а) на основе экспериментальных данных выбираются наиболее характерные переменные для изучаемого объекта и архитектурная схема их взаимодействия – базисная модель; б) с помощью соответственно выбранных (обычно разработанных ранее) инструментальных методов изучаются возможные динамические режимы функционирования такой модели; в) в зависимости от соответствия модельных режимов поведения тем, которые регистрируются в экспериментальных наблюдениях по пространственно-временному поведению изучаемого объекта, формируется оценка адекватности выбранного модельного описания. Исходя из правила «Практика – критерий истины» происходит корректировка моделей, причем выбор данных, обосновывающих корректировку, обычно берется из областей, находящихся за пределами результатов модельного описания.

Важно отметить, что возможности функционирования и развития природных биологических систем оказываются, несомненно, существенно более богатыми и гибкими в возможных реакциях, чем разного вида технические объекты, симулирующие аналогичные операции прототипа.

Наборы базисных моделей. В качестве элементов инструментария для конструктора симулятора живых систем были разработаны следующие виды базисных моделей (см., например, [10–19]):

1. Быстрые процессы обработки больших потоков информационных сигналов, связанных с формированием наборов промежуточных изображений из «элементарных» признаков, детекторов сигнала и т.п., описываются с помощью однородных нейроноподобных сетей (модели 1-го типа).

2. Для описания простейших когнитивных операций, связанных с повышением точности распознавания, принятия решений, выполнения «одноуровневых» оптимизирующих функций в рамках заданного вектора целей, формирования индексного запоминания состояний такой системы, с возможностью имитации внешнего сенсорного сигнала были разработаны минимально достаточные архитектуры распознающих систем (нейроноподобные модели 2-го типа).

3. Для иерархического описания сложных информационных сигналов, позволяющих осуществлять многоуровневые режимы обработки входных сигналов с целью «профессионально-адекватных» реакций на внешнее воздействие, разработаны версии интегральных иерархических архитектур (нейроноподобные модели 3-го типа) из управляемых или взаимодействующих простейших распознающих систем предыдущего уровня. В таких архитектурах могут существовать модули наивысшего управления (так называемые модули «Я», «ЭГО», или «Самость»), а также может быть реализована специализация по типу обрабатываемой информации: а) «одномоментное» принятие решений по ассоциациям, обычно проводят аналогию с работой правого мозга; б) поэтапно логическое принятие решений с множественными промежуточными результатами, обычно проводят аналогию с работой левого мозга.

4. Имеются также нейроноподобные модели 4-го типа, задача которых описывать процедуры преодоления противоречий в «данных», «знаниях», «принятых решениях» и т.п., которые запускаются условиями разного вида «диссонансов» (ошибки между реальными и ожидаемыми сигна-

лами). С такими моделями связано также описание процедур трансформации (развития иерархии «самостей») функциональных иерархических систем с различными уровнями отражения и понимания процессов в Природе.

Режимы функционирования базисных моделей позволяют ввести определения и описать следующие виды функциональных режимов:

1. В нейроноподобных сетях могут формироваться пространственно-временные структуры активностей, с помощью которых возможна реализация инстинктивных, бессознательных (или автоматических) процессов выделения или подавления тех сигналов, на которые система была обучена ранее. Показано, что можно построить систему для выделения любого наперед заданного сигнала (см., например, [13, 15–20]). Параллельная обработка активными элементами сети разных частей сигнального потока позволяет существенно снизить время выполнения заданных операций.

2. Нейроноподобные распознающие системы, с возможностью имитации внешнего сенсорного сигнала (модели 2-го типа), позволяют ввести определения процессов осознания системой поступающего сигнала [13–15]. Оказывается, что в зависимости от величины вычисляемой ошибки между поступившим и ожидаемым сигналом по отношению к выбранным порогам на «ресурсной диаграмме» реализуются режимы бессознательного восприятия, пропуска сигнала (когнитивные фильтры), а также осознанной обработки (оптимизирующей настройки) с запоминанием его в аналоге эпизодической памяти. Индексное описание состояний такой распознающей системы позволяет формировать «эмоционально» значимое для системы представление о прошлых событиях, а также проводить процедуры планирования будущих состояний системы (собственное целеполагание) для исправления ошибок, зарегистрированных в уже выполненных действиях [13]. Важно обратить внимание, что и для *осознанного* и для *бессознательного* выбора решений используются «данные» и «знания», которые были получены системой в прежнем опыте ее работы. Модельный аналог *интуитивного* восприятия информации определяется через процедуры получения таких «данных» и «знаний», которые отсутствовали в прежнем опыте работы системы (см., например, [9, 13, 15]). Это возможно благодаря либо внутренним программам комбинационного решения проблем, либо привнесению необходимых информационных сигналов со стороны внешних систем.

3. Детали режимов взаимодействия простейших когнитивных модулей рассматриваются с помощью нейроноподобных моделей 3-го типа [13]. Например, иерархическая архитектура из взаимодействующих моделей 2-го типа позволяет описывать настройки для более точного принятия решений всей системой в соответствии с иерархическими наборами образов: граф иерархии мотивов; граф иерархии сознательных, бессознательных, интуитивных процессов восприятия; граф иерархии ожидаемых образов (моделей обработки), который определяет состояние «внимания» в системе; граф иерархии принятых решений. В таких системах возможны режимы управления «Самостью», а следовательно, и поведением системы как со стороны низших, так и со стороны высших уровней в интегральной системе когнитивных модулей. Важную роль в особенностях динамики взаимодействия играют соответствия целевых векторов «самостей» систем и объемы используемых ими «знаний». Так, для систем с недостаточным объемом «знаний» наблюдение за поведением систем с большим объемом «знаний» и с не объявленными целями будет выглядеть непредсказуемым и за границей разумности с точки зрения наблюдающей системы. Такой тип взаимодействий позволяет формализовать определение «иррациональных» процессов. Учет упомянутых выше параметров позволяет рассмотреть различные варианты этического поведения систем (опора на интуитивные сигналы от наивысших систем управления; корпоративная этика (включая научную); этика договоренностей; этика угождения сильному и т.д.).

На основе приоритетов использования сенсорных каналов и вида режимов обработки информационных сигналов была введена важная для социальных взаимодействий классификация строев психики систем [12]: а) приоритеты интуиции – «человечный» строй психики; б) приоритеты собственного разума и целей – «демонический» строй психики; в) приоритеты автоматических реакций – «биоробот, зомби»; г) приоритеты инстинктов – «животный» строй психики.

Рассмотрение взаимных связей и иерархии воздействия при обработке информационных и управляющих сигналов между когнитивным, эмоциональным, мышечным и энергетическими модулями позволяет проводить теоретическое описание типов (около 11) акцентуаций характера личности [6]. Моделирование режимов взаимодействия между подсистемами с особенностями левого и правого полушария мозга при управлении интегральной системой позволяет рассматривать как нарушения, так и согласованную обработку информационных сигналов.

4. Динамические процедуры преодоления противоречий в модельных блоках эпизодической памяти когнитивных модулей задаются теми или иными алгоритмами поиска новых «данных» и «знаний», которые смогут перестроить «субъективное состояние» иерархической интегральной системы и повысить ее возможности для адекватного общения с реальной природной средой. Известен, например, поэтапный механизм преодоления «стресса и шока», универсальный для широкого спектра биосистем [11]. Для повышения эффективности работы предложено использовать формализованные этапы в соответствии с «полной функцией управления», которая описывает циркуляцию информации в процессе управления от момента формирования субъектом вектора целей до завершения процесса управления [12]. Обсужда-

ются схемы, в которых развитие системы происходит с помощью формирования новых уровней «самостей» в иерархической системе [10].

Виды процессов восприятия сигналов. Исходя из экспериментальных данных и теоретических описаний процессов обработки информационных сигналов людьми, принято выделять, как минимум, два вида процедур восприятия и основанных на них действий.

1. Образное, интуитивно-чувственное восприятие (см., например, [1–10]). Обработка информационных сигналов происходит полностью на биологическом субстрате. Решение принимается на основе личных субъективных ощущений и предыдущего опыта функционирования исследователя [3, 4]. Влияние оказывает степень развитости у него структур и механизмов управления прошлым опытом *«Самости»* (разными исследователями выделяется от 7 до 16 уровней в полном развитии иерархии «самостей» [4, 7, 10]). Адекватность принимаемых решений зависит также от вариантов выбора на *6 уровнях* приоритетов важности используемых данных и знаний: 1) владение методологическими знаниями и знаниями об управлении; 2) хронология, история; 3) идеологии, религии, технологии; 4) деньги, кредитно-финансовая система; 5) геноцид, наркотики, алкоголь, вредные привычки; 6) сила инструментальных воздействий [12].

Оценка правильности восприятия в соответствии с тезисом «Практика – критерий истины» основано на внутреннем чувстве, например удовлетворения, спокойствия, уверенности, следования выбранным этическим правилам, собранности при образе жизни, правил поведения, которые соответствуют выбранным целевым функциям индивида.

2. Логическое, текстуально-книжное, инженерное восприятие (см., например, [1, 2, 7, 8, 10–20]) можно разделить еще на два взаимосвязанных вида.

2.1. Поэтапно ассоциативное (см., например, [1, 2, 5–8]), в котором образы выстраиваются в логическую (а иногда и интуитивную) цепочку полного описания. Решение принимается на основе личных субъективных ощущений логики изложения и силы впечатлений от используемых образов. Эффективность решения оценивается по силе воздействия на читателя, его мотиваций к действию. На адекватность решения, конечно, оказывает влияние степень развитости структур прошлого опыта в иерархии «самостей» [4, 7, 10], а также использование при восприятии 6 уровней приоритетов «важности» используемых данных и знаний [12].

Правильность выполненных разработок (версий описания или версий технических устройств) оценивается по соответствию целевым векторам индивида. Используются некоторые логические критерии правильности (например, MDL – минимальная длина описания; различные версии голосования о принятии данной разработки в сообществе).

2.2. Формализованно-модельное, инженерное восприятие (см., например, [12–20]) опирается на результаты расчетов или версий технических устройств на основе правил, принятых в научной культуре исследователя или разработчика. Адекватность разработки, несомненно, определяется уровнем развитости структуры и механизмов работы «Самости» [4, 7, 10], а также использованием при восприятии информации 6 уровней приоритетов важности используемых данных и знаний [12].

Из приведенных формализованных схем следует, что особенности процедур познания и творческого описания Природы людьми и взаимодействие их с себе подобными зависит от соотношения используемых ими видов процессов восприятия сигналов и основанных на них действиях: *гуманитарии* приоритетно демонстрируют использование интуитивных образов, привлекая в качестве подсобных процедур наработанные ими «автоматизмы» (технологии изложения); представители *естественно-научных специальностей* считают приоритетным демонстрировать разработки в виде «автоматизмов» (технологий реализации идей, инженерных разработок), относя при этом к подсобным, вспомогательным процедурам использование в своей деятельности интуитивных образов (а иногда и относя их к фактам, не обязательным для упоминания). Существование групп исследователей, которые в своей работе гармонично используют оба вида процессов восприятия сигналов, в общественных обсуждениях особо не афишируется (вспомним хотя бы дискуссию о «физиках» и «лириках», где выделены были только крайности).

Несомненно, разработка формализованных схем и моделей, симулирующих функциональные состояния живых систем, остается актуальной для разработчиков физического и инженерного профиля. В то же время выбор областей применения, обучение моделей новым «знаниям», заполнение их соответствующими «данными» определяется в первую очередь гуманитарными представлениями (например, по шкале «полезности – опасности» использования) о текущей ситуации в нашем обществе, об изменениях условий Жизни на Земле.

Предполагаемые области применения модельных систем обычно определяют используемые в них архитектуры и спектр изучаемых режимов функционирования. Элементы теории интеллектуальных систем используются уже сейчас в технологиях управления людьми в обществе (скрытого или открытого рабства): технология окон Овертона; внедряемая сейчас ювенальная юстиция; принципы образования, с ориентацией на «потребительские» чувства; изменение ряда биологических инстинктов и т.д.

В рамках тематики нашей конференции считаю наиболее важным обсуждать такие элементы в разработках симуляторов живых систем, которые ориентированы на образовательные системы, помогающие развитию творческих способностей

людей, а также на системы медицинской диагностики.

При любом уровне развития теоретических представлений выполнение исследователем конкретных разработок всегда сопряжено с большим объемом новых трудозатрат, вызванных необходимостью вникнуть в особенности выбранной области применения и учета в разработке основных деталей ее планируемого функционирования. Поэтому оценка степени законченности текущих версий теорий «интеллектуальных систем», теорий управления живыми системами определяется исследователем в зависимости от объема его знаний из разделов кратко приведенных выше, от спектра его мотиваций, и, конечно, от векторов целей в выбранной области его деятельности. Результативность исследований в области разработок симуляторов живых систем может быть увеличена при сосредоточении усилий заинтересованных в такой работе специалистов в первую очередь на решении проблем (отдавая должное используемому инструментарию), а также при поддержании атмосферы «соборности» во взаимодействиях между ними [5, 12].

Работа выполнена при поддержке грантов программы президиума РАН «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики», грантов РНФ № 15-18-00047 и 14-11-00693.

Литература

1. *Пиаже Ж.* Психология интеллекта. 1942 ; 1948. URL: http://fanread.ru/book/4343688/.

2. *Анохин К.В.* Когнитом – гиперсетевая модель мозга [презентация лекции 20 января 2015 года на XVII Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2015»].

3. Тибетская йога и тайные учения, или Семь книг о мудрости великого пути. М. : ФАИР-ПРЕСС, 2001. 480 с.

4. *Ошо.* Психология эзотерического. М. : Нирвана, 2004. 160 с.

5. *Маслоу А.* Мотивация и личность. 3-е изд. СПб. : Питер, 2008. 352 с.

6. *Личко А.Е.* Акцентуации характера как концепция в психиатрии и медицинской психологии // Обозрение психиатрии и медицинской психологии им. В.М. Бехтерева. 1993. № 1. URL: https://psyinst.ru/library.php?part=article&id=1305.

7. *Свияш А.* Проект «Человечество» : успех или неудача? Размышления о людях и их странном поведении. М. : АСТ : Астрель, 2006. 286 с.

8. *Уилсон Р.А.* Прометей восставший. Психология эволюции. К. : ЯНУС, 1999. 304 с. URL: http://www.yugzone.ru/uilson.htm.

9. Психология : словарь / под общ. ред. А.В. Петровского, М.Г. Ярошевского. М. : Политиздат, 1990. 494 с.

10. *Уилбер К.* Интегральная психология : Сознание, дух, психология, терапия. М. : АСТ [и др.], 2004.

11. *Парин С.Б.* Роль эндогенной опиоидной системы в формировании экстремальных состояний : дис. … докт. биол. наук. М., 2011. 491 с.

12. Основы социологии [Электронный ресурс] / ВП СССР. СПб., 2010. URL: http://kob.su/kobbooks/osnovy-stsiologii.

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

14. *Осипов Г.С., Панов А.И., Чудова Н.В.* Управление поведением как функция сознания. 1. Картина мира и целеполагание // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 49.

15. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.* О роли понятий «образ» и «символ» в моделировании процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 5–21.

16. *Шумский С.А.* Реинжениринг архитектуры мозга: роль и взаимодействие основных подсистем // XVII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Нейроинформатика-2015» : лекции по нейроинформатике. М. : НИЯУ МИФИ, 2015. С. 13–46.

17. *Жданов А.А.* Автономный искусственный интеллект. М. : Бином. Лаборатория знаний, 2008. 359 с.

18. *Нечаев Ю.И.* Контроль чрезвычайных ситуаций в интегрированной среде виртуального полигона на основе современной теории катастроф // XVII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Нейроинформатика-2015» : лекции по нейроинформатике. М. : НИЯУ МИФИ, 2015. С. 220–273.

19. *Villacorta-Atienza J.A., Velarde M.G., Makarov V.A.* Compact internal representation of dynamic environments: Simple memory structures for complex situations // Cognitive Systems Monographs. 2014. V. 21. P. 83–100. URL: http://www.scopus.com/record/display.url?eid=2-s2.0-84927626187&origin=inward&txGid=AD53732F6FECA37F1BDD3A260DD1A523.zQKnzAySRvJOZYcdfIziQ%3a1.

20. *Терехов С.А.* Перечитывая Лео Бреймана // XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2014» : лекции по нейроинформатике. М. : НИЯУ МИФИ, 2014. С. 8 ; Активное обучение : технический семинар в компании Яндекс [Электронный ресурс]. 25.04.2013. URL: https://events.yandex.ru/lib/talks/905/.

Авторский указатель

А

Аверкина Л.А. 9
Айдаркин Е.К. 163
Александров И.О. 12, 144
Александров Ю.И. 220
Алексеев А.К. 16
Алешин К.Н. 23
Антонец В.А. 19, 23, 117

Б

Бахчина А.В. 27, 30, 123
Бахшиев А.В. 33
Беллюстин Н.С. 37, 225
Белоусов К.И. 39
Берестин Д.К. 41
Бесхлебнова Г.А. 191
Блинов А.В. 91
Бондарь А.Т. 230
Бронфельд Г.Б. 45
Буланов Н.А. 27
Бурцев М.С. 71

В

Великова С. 48
Вергунов Е.Г. 152
Вечкапова С.О. 105
Виллакорта-Атиенза Х. 136
Витяев Е.Е. 51
Вохмина Ю.В. 55, 95, 98

Г

Габова А.В. 248
Гавриленко Т.В. 95
Гай В.Е. 58
Голубев А.М. 61
Горбунов Д.В. 55
Григоренко В.В. 234
Григорьева В.Н. 117
Гринченко Ю.В. 220
Громов К.Н. 64
Грубов В.В. 68, 201, 216
Гунделах Ф.В. 33

Д

Даянова Д.Д. 98
Дегтерев А.А. 71
Демарева В.А. 30
Дмитриева Л.А. 75, 78
Добрин А.В. 152
Дорожкин А.М. 81
Дорошева Е.А. 61
Драницына А.А. 83
Дружков К.А. 147
Дудник А.В. 136

Е

Евтушенко А.И. 86
Елисеев М.Е. 179
Еремин Е.В. 179
Еськов В.В. 55, 91, 95, 101
Еськов В.М. 98, 101

З

Запара Т.А. 105, 187
Зимин М.И. 95
Золотухин В.В. 251
Зорина Д.А. 75, 78
Зорина З.А. 108

И

Иваницкий Г.А. 112

К

Казимирова Е.Д. 115
Казымаев С.А. 220
Калинина С.Я. 117
Карп В.П. 263
Килин С.Я. 137
Козлов А.С. 41
Колтунова Т.И. 177
Комарова М.В. 119
Комольцев И.Г. 119, 248
Королева М.Е. 123
Короновский А.А. 68, 201, 216
Корсакова-Крейн М.Н. 64, 125
Крупа В.В. 179
Крылов А.К. 129
Кузнецова Г.Д. 248
Кулаков С.В. 251
Кульчицкий В.А. 137
Куперин Ю.А. 75, 78
Куровская М.К. 201

Л

Левенец Я.В. 132
Леонтьев В.А. 33
Лобов С.А. 136
Ломакина О.В. 177
Лосик Г.В. 137

М

Макаренко Н.Г. 141
Макаров В.А. 136, 143
Максимова Н.Е. 12, 144
Малафеев А.Ю. 147
Милов В.Р. 203
Мурышкина А.И. 75
Мусиенко П.Е. 33
Мухина И.В. 183

Н

Некрасова М.М. 179
Непомнящих В.А. 149, 191
Никитин А.П. 259, 263
Николаева Е.И. 152
Никонов Ю.В. 155
Нужина Н.С. 183
Нуйдель И.В. 159

О

Обозова Т.А. 108
Осипова Е.А. 149, 191

П

Павловская М.А. 163
Панкова Н.А. 149
Пантелеева С.Н. 132
Парин С.Б. 123, 166, 179
Парина И.С. 170
Пахомов А.А. 98
Петухов А.Ю. 173
Подладчикова Л.Н. 177
Полевая С.А 27, 123, 173, 179, 211
Поскина Т.Ю. 238
Продиус П.А. 183
Прокопеня В.К. 266
Проскура А.Л. 105, 187
Пряхин В.Ф. 185

Р

Радченко Г.С. 64
Ратушняк А.С. 105, 187
Рахилина Е.В. 190
Редько В.Г. 191, 195
Резникова Ж.И. 132
Романова Т.В. 198
Романчук А.Л. 41
Руннова А.Е. 201
Рябко Б.Я. 132

С

Савельев В.Ю. 37
Савченко А.В. 203
Савченко Л.В. 207
Савчук Л.В. 211
Сварник О.Е. 213
Семерез О.Б. 91
Серова М.С. 27
Сидоренко Д.А. 234, 238
Сизов Ю.А. 37
Синеокова Т.Н. 27, 30
Ситникова Е.Ю. 68, 216
Сметанин Н.М. 75
Смирнова А.А. 108

Смольников Б.А. 33
Созинов А.А. 220
Соколов И.С. 223
Соколов М.Е. 159
Соколова Е.С. 225
Стрельцова Т.В. 238

Т

Твердислов В.А. 227
Тельных А.А. 225
Тишкина А.О. 119
Турубар Д.С. 144

У

Утробин В.А. 58
Уфимцева Н.В. 228

Ф

Федотчев А.И. 64, 211, 230
Филатов М.А. 234, 238
Филатова Д.Ю. 234
Филатова О.Е. 101
Фортунатов А.Н. 241
Фортунатов Н.М. 241
Фортунатова В.А. 244

Х

Хадарцев А.А. 101
Хапов И.В. 248
Харитонов А.А. 23
Хоборов С.В. 123
Храмов А.Е. 68, 201, 216

Ц

Циркова М.М. 211
Цукерман В.Д. 251

Ч

Чеберева О.Н. 255
Чевачин А.А. 23
Чепилко С.С. 78
Чернавская О.Д. 259, 263
Чернавский Д.С. 259, 263
Черниговская Т.В. 266
Черников Н.А. 41

Ш

Шадрин Г.А. 55
Шакирова Л.С. 41
Шапошников Д.Г. 177
Шарипова Т.А. 191
Шишалов И.С. 179
Щепетов Д.С. 259

Э

Эйнгорин М.Я. 269
Эльман К.А. 91

Я

Яхно В.Г. 19, 271

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2015

ТРУДЫ IV ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Оригинал-макет
подготовлен Редакционно-издательской группой ИПФ РАН

Бумага «DATA COPY».
Усл. печ. л. 34,5. Уч.-изд. л. 30,0.
Тираж 150 экз. Заказ № 77(2015)

Отпечатано на ризографе в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46