Федеральное агентство научных организаций
Российская академия наук
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук»
Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований
Российская ассоциация нейроинформатики
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородская государственная медицинская академия»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
ООО «Медуза»

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2017

ТРУДЫ
V ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2017

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)
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)
Чернавская Ольга Дмитриевна (Физический институт РАН, Москва)
Шахов Борис Евгеньевич (НГМА, 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)
Стасенко Сергей Викторович (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, И.А. Кокорина, И.В. Нуйдель, С.Б. Парин, С.А. Полевая, А.М. Сергеев, В.Г. Яхно

Конференция организована при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 17-02-20283Г, договор № 17-02-20283/17 от 30.05.2017) и ФАНО (соглашение № 007-02-1255/1 от 11.04.2017 между ФАНО и ИПФ РАН)

Электронный адрес оргкомитета: nuidel@appl.sci-nnov.ru
Веб-сайт конференции: http://nd-cogsci.iapras.ru/2017/index.html

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 7

Аверкина Л.А. Национальные варианты немецкого языка (Германия, Австрия, Швейцария) и перевод немецкоязычных текстов экологической тематики 9

Александров Ю.И. Обратимая системная дедифференциация при регрессии: шаг назад для движения вперед 12

Александрова Н.Ш. Естественный билингвизм как нелинейная самоорганизующаяся система 15

Алексеев А.К. О глобальной линеаризации и связи оператора Купмана – Карлемана с нейросетями 18

Андреев А.В., Руннова А.Е., Макаров В.В., Грубов В.В., Писарчик А.Н. Измерение стохастических свойств нейронных ансамблей головного мозга при интерпретации визуальных стимулов 21

Антонец В.А. Ретроспектива как способ преодоления когнитивной слепоты 25

Антонец В.А., Харитонов А.А. Ошибки управления физическим признаком объекта: технология сбора и анализа данных при помощи интерактивных систем опроса 28

Бажанова М.В., Симонов А.Ю., Лобов С.А., Балашова К.И., Макаров В.А., Казанцев В.Б. Возбуждение циклической активности в модельных нейронных сетях 31

Баженова А.Е., Илюйкина И.В., Трусов М.В., Гимадиев Б.Р. Принципы организации движений и гипотеза Н.А. Бернштейна «о повторении без повторений» 33

Бахчина А.В., Парина И.С. Динамика нерегулярности сердечного ритма при решении задач на родном (русский) и иностранном (немецкий) языках 36

Бахшиев А.В., Станкевич Л.А., Гунделах Ф.В., Михайлов В.В. Модель нейрона со структурной адаптацией и ее программная реализация в нейроморфных системах 38

Беллюстин Н.С., Савельев В.Ю., Тельных А.А. Об эволюционных принципах формирования когнитивных систем 45

Белощенко Д.В., Щипицин К.П., Илюйкина И.В., Трусов М.В. Влияние гипотермического воздействия на моторные функции человека 48

Бендерская Е.Н. Неопределенность окружающей среды как фактор обучения и структурообразования нелинейных динамических систем 51

Берестин Д.К., Алиев Н.Ш., Иржанова Д.Т., Шейдер А.Д. Произвольные и непроизвольные движения с позиции компартментно-кластерного подхода 55

Бовырина А.А., Тельных А.А. Автоматическая оценка мотивационных критериев с использованием психографических тестов 57

Бондарь А.Т., Шубина Л.В. Нелинейные процессы в электрической активности структур лимбической системы морской свинки в ответ на ритмическую фотостимуляцию 60

Бронфельд Г.Б. Новый анализ взаимосвязи понятий информации и знаний на междисциплинарной основе 63

Витяев Е.Е. Сознание – логически непротиворечивая прогностическая модель реальности 67

Вохмина Ю.В., Берестин Д.К., Клюс Л.Г., Горбунов С.В. Компартментно-кластерные модели эволюции болезни Паркинсона 71

Гаврилов В.В. Связанные с поведением суммарные потенциалы мозга при реализации одного и того же инструментального поведения, сформированного разными способами 74

Гай В.Е., Дербасов М.О. Модель классификации и поиска музыкальных записей 77

Галкин В.А., Еськов В.М., Гавриленко Т.В., Девицын И.Н. Гомеостатические системы и теорема Такенса об обнаружении «странных аттракторов» 80

Григорьев Н.А., Лукоянов М.В., Гордлеева С.Ю., Пимашкин А.С., Савосенков А.В., Казанцев В.Б., Каплан А.Я. Динамика формирования навыка представления движений у оператора контура интерфейса «мозг – компьютер» с тактильной обратной связью 83

Демарева В.А., Полякова П.Д. Зрительно-моторная координация при чтении текстов как отражение уровня языковой подготовки человека..... 86

Дорошева Е.А., Голубев А.М. Проблематика оценки аспекта осознанности «наблюдение»..... 90

Еськов В.В., Горбунов Д.В., Клюс Л.Г., Булатов И.Б. Хаотическая динамика параметров электроэнцефалограмм..... 94

Еськов В.М., Галкин В.А., Филатова О.Е., Еськов В.В. Гомеостатичный мозг: хаос нейросетей мозга 97

Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. Исследование синхронных и асинхронных ритмов мозговой активности, возникающих у грызунов, находящихся в состоянии покоя 101

Журавлев М.О., Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. Исследование перемежающегося поведения, возникающего при восприятии неоднозначных изображений (куб Неккера): теория и эксперимент 103

Журавлев М.О., Руннова А.Е., Протасов П.А. Комплексный подход к исследованию высших психических функций человека в их взаимосвязи с нейрофизиологическими процессами и личностными характеристиками 105

Иваницкий Г.А., Таротин И.В. «Когновизор» – устройство слежения за когнитивной деятельностью 108

Камратов С.В., Полевая А.В., Полевая С.А. Особенности зрительно-моторной активности при просмотре аффективных изображений с разной эмоциональной валентностью..... 113

Коломбет В.А. Обнаружение частот Пица в когнитивных процессах..... 116

Колосов А.В., Нуйдель И.В. Исследование преобразований периодического внешнего сигнала в модели таламокортикальной ячейки 119

Корсакова-Крейн М.Н., Мигунова Н.В., Полевая С.А. Вегетативные отображения эмоциональных образов, связанных с прослушиванием коротких музыкальных фрагментов 122

Котов А.А., Аринкин Н.А., Зайдельман Л.Я., Зинина А.А. Когнитивная архитектура робота Ф-2, поддерживающего коммуникацию с человеком..... 126

Крылов А.К. Актуализация опыта как возможная причина фрактальной структуры поискового поведения 128

Майстренко В.И., Майстренко Е.В., Курманов И.Г. Психофизиология слухового анализатора и параметры движений человека..... 132

Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С. Формальное описание семантики решения задач методики «Ход шахматного коня» 135

Меклер А.А., Борисенок С.В. Выявление характерных периодов при вычислении сложности Лемпеля – Зива сигнала ЭЭГ с переменным окном..... 139

Милов В.Р., Дмитриев А.В., Гай В.Е. Система обнаружения и распознавания объектов в видеопотоке 141

Минина Е.Н. Когнитивный графический образ одноканальной ЭКГ в оценке кардиогемодинамики 144

Некрасова М.М., Федотова И.В., Блинова Т.В., Парин С.Б., Полевая С.А. Динамика психофизиологической системы в условиях стресса у спортсменов при физической нагрузке..... 148

Непомнящих В.А., Редько В.Г. Возможные подходы к моделированию нестандартного познавательного поведения животных 151

Никонов Ю.В. Маршрутизация информации в многослойных нейронных сетях головного мозга в контексте межполушарной асимметрии на примере алкогольной зависимости..... 154

Нуйдель И.В., Соколов М.Е. Примеры расчетов динамических процессов при преобразовании сенсорных сигналов..... 157

Ольшанский В.М. Становление электродинамики как модельный эволюционный эксперимент 160

Павловская М.А., Айдаркин Е.К. Исследование дельта-, тета- и альфа-вызванной ритмической активности мозга человека в условиях сенсорной маскировки 164

Парин С.Б., Полевая С.А., Черниговская Т.В., Парина И.С., Конина А.А., Кнабенгоф М.А. Вегетативные проявления острого стресса при экспериментальном моделировании процесса синхронного перевода 167

Пахомов А.М., Шемагина О.В. Разработка программно-аппаратного комплекса для паспортизации жидких пищевых продуктов 170

Полевая С.А., Воловик М.Г., Хижняк Е.П. Динамическое инфракрасное картирование кожных покровов человека 172

Продиус П.А. Нейрофизиологические маркеры контроля поведения в парадигмах go/nogo и novel .. 176

Проскура А.Л., Запара Т.А., Ратушняк А.С. Синапс как многокомпонентная и многоуровневая когнитивная система 179

Радаева Т.М., Маркелова К.А., Трушина И.А., Логинова И.А., Бак М.В., Семерикова Ю.И. Задержки речевого развития как показатель когнитивных нарушений 183

Ратушняк А.С., Запара Т.А., Проскура А.Л., Сорокоумов Е.Д. Реализация прогностической функции внутринейронными молекулярными сигнальными комплексами 185

Русак С.Н., Филатова О.Е., Бикмухаметова Л.М. Нелинейная динамика погодно-климатических факторов и состояние параметров организма 188

Савосенков А.В., Григорьев Н.А., Лукоянов М.В., Гордлеева С.Ю., Каплан А.Я. Определение временных параметров транскраниальной магнитной стимуляции, задающих оптимальные характеристики работы оператора в контуре интерфейса «мозг – компьютер» 190

Сварник О.Е. Нейронные механизмы индивидуальных различий приобретения новых навыков 192

Степанова Е.Ю., Радаева Т.М., Борисов В.И. Когнитивные расстройства у детей с вегетативной дистонией 195

Сельский А.О., Журавлев М.О., Егоров И.В., Храмов А.Е. Исследование связей в головном мозге на основе данных ЭЭГ с помощью метода нелинейных корреляций 198

Сизов А.Ю., Тюриков М.И., Федосова Л.О. Разработка интеллектуальной системы управления роботизированным беспилотным транспортным средством 201

Ситникова Е.Ю., Грубов В.В., Короновский А.А., Храмов А.Е. Медленноволновая активность на ЭЭГ при абсанс-эпилепсии 203

Созинов А.А., Гринченко Ю.В., Александров Ю.И. Динамика мозгового обеспечения поведения после перехода от задания к заданию при их чередовании 206

Созинова И.М., Бахчина А.В., Александров Ю.И. Вариабельность сердечного ритма при разных стратегиях решения моральных дилемм «свой» – «чужой» детьми на последовательных стадиях онтогенеза 208

Тарасова А.Ю., Полетаева И.И., Перепелкина О.В. Особенности поведения мышей, селектированных по когнитивному признаку 210

Ткаченко В.В., Лосик Г.В., Дерюгин А.А., Фатеев М.К. Кибернетическая парадигма манипуляций ребенка с игрушкой 212

Умнов А.Л. Формирование персонального информационного образа с помощью системы Alterozoom 215

Утробин В.А. Информационная значимость хиазмы зрительных путей 217

Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Полевая С.А., Савчук Л.В. Об эффективности биоэлектрического управления в интерфейсе «мозг – компьютер» 219

Филатов М.А., Филатова Д.Ю., Колосова А.И., Григорьева С.В., Аскарова Д.В. Новый метод использования нейроэмуляторов в психофизиологии 222

Цукерман В.Д. Пластические сети – нейродинамическая основа когнитивных функций мозга 226

Цукерман В.Д., Еритенко Н.А. Математическая модель пространственной ориентации на основе нейродинамического баланса возбуждения и торможения в нейронной сети 229

Чеберева О.Н. Процесс архитектурного формообразования как результат геометризации архитипических режимов воображения 233

Чернавская О.Д., Рожило Я.А., *Чернавский Д.С.* О возможности разрешения научных парадоксов в искусственной когнитивной системе 238

Черниговская Т.В., Конина А.А., Алексеева С.В., Кнабенгоф М.А. Поле внимания при реализации синхронного перевода 242

Чувгунова О.А. Формирование внутреннего плана действий: специфика ЭЭГ-данных в зависимости от когнитивных характеристик 244

Чугрова М.Е., Бахчина А.В., *Парин С.Б., Полевая С.А.* Динамика функционального состояния человека при монологической речи 246

Шумский С.А. Революция глубокого обучения 249

Эйнгорин М.Я. Природные, теоретические основы структур нуклеотидов, грамматик и генов живых систем 250

Яхно В.Г. Достижения и проблемы в использовании «концептуальных моделей мозга» 251

Авторский указатель 255

Предисловие

В сборнике представлены материалы пленарных лекций, докладов на секционных и постерных секциях юбилейной, 5-й, Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях», которая проходит 25–29 сентября 2017 года. Конференция посвящается светлой памяти первопроходцев когнитивной науки Дмитрия Сергеевича Чернавского, Галины Дмитриевны Кузнецовой, Геннадия Германовича Комиссарова.

Результаты проведенных за прошедшее десятилетие работ в этом направлении и обсуждения этих результатов на нашей и других конференциях учеными разных специальностей еще раз подтвердили плодотворность использования физических методов в познании механизмов управления в живой природе.

Напомним, что термин «нелинейная динамика» в названии конференции указывает на приоритетное использование соответствующих физических методов для исследования и формализованного (модельного) описания нейроноподобных механизмов обработки информационных сигналов. Слова «в когнитивных исследованиях» указывают на цели этой работы – использование получаемых результатов для формализованного описания интеллектуальной деятельности человека в ее разнообразных проявлениях. Сочетание изначально естественно-научных и гуманитарных подходов приводит сегодня к формированию принципиально новых научных направлений: физики когнитивных систем, когнитивной информатики и т. д. Задачи физики когнитивных систем сегодня очевидны: это поиск объективных закономерностей, определяющих общие принципы функционирования сложных информационных («интеллектуальных») систем как биогенного, так и искусственного происхождения. Очевидно, что для объективизации наших знаний в этой области требуется и создание новых инструментов измерения и моделирования, и разработка новой физической методологии.

Когнитивная информатика – мультидисциплинарный комплекс знаний и технологий, обеспечивающих картирование и организацию когнитивных процессов в индивидуальных, социальных и искусственных информационных системах. В конце XX века произошел научный прорыв в исследованиях мозга и компьютерного моделирования элементов сознания. Актуально развитие знаний о процессах обучения, коммуникации, обработки информации человеком и животными, о способах управления восприятием, решениями и программами действий как отдельного субъекта, так и социальных групп.

Взаимодействие между когнитивной наукой и компьютерными технологиями является двусторонним. С одной стороны, когнитивная информатика использует компьютерные технологии и информатику для решения проблем когнитивной науки в изучении биологических механизмов памяти, научения, принятия решений. При этом открываются новые возможности для изучения, диагностики, развития и совершенствования когнитивных функций человека с учетом генетических, возрастных и социальных факторов. Развитие когнитивных функций имеет непосредственное отношение к развитию интеллекта. На практике, накапливать в ряду поколений и применять знания может пока только человек. С другой стороны, когнитивная информатика применяет когнитивные теории для решения проблем информатики, разработки новых компьютеров и программной инженерии. Формализованные описания когнитивных способностей человека обеспечивают возможности как для развития мировоззрения самих исследователей, так и для перенесения когнитивных функций с биологической элементной базы на электронную. В числе современных подходов, решающих поставленную задачу, следует особо отметить динамическую теорию информации, нейросемантический подход, нейросети, модели нечеткой логики, эволюционные вычисления. Когнитивные информационные технологии лежат в основе разработки искусственных когнитивных систем, целями которых является получение новых знаний, принятие решений в сложных (новых) ситуациях, интеллектуальная обработка данных и др. По мере развития общества и усложнения задач социального управления потребность в таких системах становится все более острой. Соответственно, будут предъявляться все более высокие требования к точности воспроизведения реальных систем.

Не случайно когнитивные технологии включены в перечень критических технологий Российской Федерации. Широкое внедрение когнитивных информационных систем в ближайшем будущем способно вызвать радикальные изменения в образовании, медицине, социальной инженерии и архитектуре компьютеризированных систем.

В настоящее время когнитивным исследованиям уделяется повышенное внимание, учреждены соответствующие научные общества: Cognitive Science Society, Hellenic Cognitive Science Society, EEG & Clinical Neuroscience Society, Центр когнитивных программ и технологий, Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований (МАКИ) и др. Наша конференция позиционируется как одно из ответвлений

основной конференции МАКИ «Когнитивные исследования», и поэтому именно объединение гуманитарного и естественно-научного знания рассматривается в качестве одной из важнейших целей. В то же время, возможно, не менее важным результатом является демонстрация плодотворности сотрудничества ученых разных специальностей – психологов, социологов, философов, лингвистов, психолингвистов, математиков, программистов, кибернетиков, антропологов и др. Когнитивная наука, как наука междисциплинарная, не может быть построена без такого сотрудничества, обеспечивающего интеграцию знаний разного типа на основе согласованных физических модельных представлений. Налаживание такого сотрудничества – дело сложное и технически, и ментально. Оно требует усилий, терпения и стремления согласовывать взгляды и языки описания: объяснять свою позицию; понимать позицию собеседника. Такое сотрудничество позволяет получать наиболее полное и адекватное представление о таком сложном феномене природы, как человеческое сознание и разум. Именно это имели в виду организаторы, подчеркивая междисциплинарный статус конференции.

Кажется, что такое формирующееся сотрудничество можно описывать так, будто все мы занимаем соседние места у исследовательского конвейера, назначение которого – добыча, осмысление, демонстрация и использование научного знания о человеке. Описание такого конвейера можно увидеть в докладе В.В. Смолянинова на нашей 3-й конференции. В нем этот конвейер описан как последовательность когнитивных парадигм:

«Я знаю то, что могу описать».
«Я знаю то, что могу доказать».
«Я знаю то, что могу измерить».
«Я знаю то, что могу построить».
«Я знаю то, что могу запрограммировать».
«Я знаю то, что могу понять».

По сути, это и есть описание различных этапов познания изучаемых жизненных процессов.

Дорогие коллеги, на нашей конференции будут обсуждаться текущие достижения, проблемы использования результатов исследований, а также доступные нам условия выполняемых работ.

Запланированы и круглые столы по следующим тематикам:

1. Достижения и проблемы в развитии модельного описания механизмов адаптивных и ментальных процессов в когнитивных системах.

2. Достижения и проблемы в развитии инструментальных средств исследования и регистрации параметров динамики функционального состояния живых и технических систем распознавания.

3. Достижения и проблемы в использования полученных результатов в прикладных целях.

Многое зависит от используемых нами методик формирования согласованных знаний, структуризации объемов данных об объектах исследований, ответственности за выбранные этические и нравственные подходы в процессе наших разработок.

Желаем всем нам успеха!

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

Национальные варианты немецкого языка (Германия, Австрия, Швейцария) и перевод немецкоязычных текстов экологической тематики

Л.А. Аверкина

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

В процессе своего исторического развития язык подвержен изменениям, причем эти изменения протекают неоднородно, что обуславливает появление национальных языковых вариантов наряду с литературным языком. Суть проблемы заключается в том, что национальные варианты языка, с одной стороны, находятся в подчиненном положении по отношению к стандартной языковой норме, а с другой стороны, стремятся к своей независимости и самостоятельности.

Эта проблема в полной мере относится к ***литературной норме немецкого языка*** и его национальных вариантов – ***австрийского немецкого*** и ***швейцарского немецкого***. В связи с этим в обществе предпринимаются шаги, направленные на то, чтобы сохранить национальные особенности немецкого языка, и многие тексты в связи с этим отражают национальный характер. Различия между стандартным немецким, австрийским немецким и швейцарским немецким относятся прежде всего к лексике, а также, в определенной степени, к грамматике и фонетике. Особенно много различий наблюдается в лексике, ***касающейся государственного устройства и управления, права и юриспруденции, культуры, экологии, кулинарии и многих других сфер.***

Данная статья посвящена конкретному анализу проблемы перевода текстов экологической тематики с учетом различных национальных вариантов. Сфера экологии выбрана потому, что в настоящее время данная тематика является чрезвычайно актуальной и интересной с точки зрения переводоведения, а 2017 год объявлен в России годом экологии. Как известно, сегодня во всем мире наблюдается ухудшение состояния окружающей среды. Перед человечеством стоит грандиозная задача – остановить этот процесс. Для ее решения необходимо взаимодействие и обмен опытом между различными областями науки, производства и повседневной жизни в международном масштабе. Это обуславливает возросший объем текстов экологической тематики, которые в свою очередь требуют перевода. Так как Германия, Австрия и Швейцария занимают ведущие позиции в вопросах экологии, наиболее активно в этом вопросе Россия сотрудничает именно с ними.

Для сравнения значений национальных вариантов немецкого языка в нашем исследовании за основу взята классификация национально-культурной лексики немецкого лингвиста, специалиста в области германистики, социолингвистики и диалектологии Ульриха Аммона, согласно которой лексические особенности австрийского варианта обозначаются в лингвистике как ***австрицизмы*** (нем. Austriazismen), особенности швейцарского варианта обозначаются как ***гельветизмы*** (нем. Helvetismen), германская лексика обозначается термином ***тевтонизмы***, также германизмы (нем. Teutonismen). У. Аммон подчеркивает, что переводчику в процессе перевода необходимо учитывать факт существования ***национальных вариантов немецкого языка*** (немецкого, австрийского, швейцарского), которые обладают своими особенностями [1. С. 46].

Для определения принадлежности лексем к тому или иному национальному варианту немецкого языка переводчику при анализе текста в первую очередь следует пользоваться словарями, например: Österreichisches Wörterbuch, Rectschreib Duden, Schweizer Schülerduden, Deutsche Aussprache [5, 3, 6, 2].

Анализ текстов показал, что иногда для передачи одного денотата все три национальных варианта могут располагать разными лексическими единицами:

Немецкий вариант	Австрийский вариант	Швейцарский вариант
Gebiet-Statistik, Regionalstatistik	*regionale Statistik*	*Arealstatistik*
Weidenwald	*Hutewald*	*Wytweiden*

Мы выяснили также, что термин может совпадать в двух национальных вариантах, но отличаться в третьем:

Немецкий вариант	Австрийский вариант	Швейцарский вариант
Müllverbrennung	*Müllverbrennung*	*Kehrichtverbrennung*
Ressourcenberechnung	*Ressourcenberechnung*	*Ressourcenbuchhaltung*
Naturparks	*Naturparks*	*Regionale Naturpärke*
Naturerlebnisparks	*Naturerlebnisparks*	*Naturerlebnispärke*
Autobahn, Fernstraße	*Autobahn, Fernstraße*	*Nationalstraße*

Более того, следует отметить, что в одном или нескольких национальных вариантах может отсутствовать сам денотат:

Немецкий вариант	Австрийский вариант	Швейцарский вариант
Rußfilter	*Partikel Filter*	–
–	*Geologisches Informationssystem (GInS)*	–
Luftraumsteuer	–	–
«Blauer Engel»	*«Österreichisches Umweltzeichen»*	–
–	*Nationalrat*	*Nationalrat*
–	–	*Nationalpärke mit Kernzonen*

Многие переводчики считают, что ошибки в языковой норме и узусе лишь несущественно влияют на смысловую сторону перевода. Главной задачей переводчика, по их мнению, является обеспечение коммуникации между разноязычными партнерами и такие детали, как языковая норма и узус, не всегда имеют большое значение.

Согласиться с данной точкой зрения нельзя. В своей книге «Einführung in die Übersetzungwissenschaft» швейцарский лингвист Вернер Коллер, занимающийся большей частью вопросами эквивалентности при переводе, отмечает, что перевод в широком смысле – это работа с культурой и только в узком смысле – работа с языком [4. С. 57]. Справедливо и утверждение болгарских переводчиков, теоретиков перевода С.И. Влахова и С.П. Флорина, что национальная (местная) окрашенность лексики является добавочным, дополнительным значением к основному, смысловому. Однако в определенных языковых ситуациях ошибки в употреблении национально-окрашенных словоформ в такой степени влияют на восприятие, что искажают и заслоняют собой смысл сказанного или написанного [9. С. 104]. При этом большое количество узуальных ошибок, как известно, вызывает у получателя перевода сомнения в компетентности переводчика.

Классик отечественного переводоведения Л.К. Латышев выделяет два этапа процесса перевода: перевыражение содержания исходного текста (ИТ) средствами системы переводного языка (ПЯ) и адаптация создаваемого текста перевода к норме и узусу ПЯ [10. С. 48]. То есть приспособление национально-культурной лексики к нормам ПЯ происходит на втором этапе перевода, когда основное значение уже понято, осталось лишь подобрать подходящий вариант перевода. При письменном переводе переводчику необходимо каждый раз сверяться со словарем или собственными глоссариями на предмет существования региональной лексической единицы, относящейся к одному из вариантов немецкого языка (немецкий, австрийский, швейцарский).

Как следует из вышесказанного, в процессе перевода текстов с русского языка на немецкий необходимо ориентироваться на национальную специфику. Проанализируем перевод следующего контекста:

Русский оригинал		
*...**Сжигание** всё равно не избавляет от проблемы отходов. Оставшийся в топках негорючий шлак, уловленная в очистных установках зола составляют до 10 % по объему и 30 % по массе первоначального количества ТБО «въехавшего» в ворота **МСЗ** (**мусоросжигательный завод**)* [11. С. 17]		
Перевод		
Немецкий*	**Австрийский***	**Швейцарский**
***Die Müllverbrennung** löst das Abfallproblem nicht. Reaktionsträge Schlacke, die in Brennofen bleiben, und Asche, die in Filteranlagen abgefangen werden, bilden 10 % des Volumens und 30 % der Masse den festen Haushaltsabfällen, die am Anfang zur **Müllverbrennungsanlage** geliefert wurden*	***Die Müllverbrennung** löst das Abfallproblem nicht. Reaktionsträge Schlacke, die in Brennofen bleiben, und Asche, die in Filteranlagen abgefangen werden, bilden 10 % des Volumens und 30 % der Masse den festen Haushaltsabfällen, die am Anfang zur **Müllverbrennungsanlage** geliefert wurden*	***Die Kehrichtverbrennung** löst das Abfallproblem nicht. Reaktionsträge Schlacke, die in Brennofen bleiben, und Asche, die in Filteranlagen abgefangen werden, bilden 10 % des Volumens und 30 % der Masse den festen Haushaltsabfällen, die am Anfang zur **Kehrichtverbrennungsanlage** geliefert wurden*

При переводе в данном контексте терминов ***сжигание*** и ***мусоросжигательный завод*** на немецкий и австрийский национальные варианты мы применили зафиксированные в словарях термины ***Müllverbrennung*** и ***Müllverbrennungsanlage***, но в случае, когда мы имеем дело с переводом для носителей швейцарского национального варианта, стоит остановиться на выборе терминов ***Kehrichtverbrennung*** и ***Kehrichtverbrennungsanlage***, повсеместно употребляемых в Швейцарии в отношении сжигания промышленного мусора. Выбор терминов в данном случае зависит, как показывает исследование, от национального варианта, от национальной принадлежности заказчика перевода.

Неверно полагать, что терминология в немецком и австрийском варианте всегда совпадает. Следующий контекст показывает, что немецкий и швейцарский национальные варианты могут иметь общий термин, а австрийский национальный вариант – отличный от них.

Русский оригинал		
...Как считают экологи, алюминий, применяющийся в качестве материала ***для упаковки пищевой продукции****, вступает в реакцию с ее содержимым, выделяя вредные вещества* [7. С. 59]		
Перевод		
Немецкий*	**Австрийский**	**Швейцарский***
Nach der Meinung von Ökologen reagiert Aluminium, das als Ausgangsmaterial für ***Lebensmittelverpackungen*** *verwendet wird, mit deren Inhalt und scheidet Schadstoffe aus*	*Nach der Meinung von Ökologen reagiert Aluminium, das als Ausgangsmaterial für* ***Lebensmittelemballage*** *verwendet wird, mit deren Inhalt und scheidet Schadstoffe aus*	*Nach der Meinung von Ökologen reagiert Aluminium, das als Ausgangsmaterial für* ***Lebensmittelverpackungen*** *verwendet wird, mit deren Inhalt und scheidet Schadstoffe aus*

В данном контексте можно увидеть различия в употреблении лексической единицы для обозначения ***упаковки пищевой продукции***. В отличие от немецкого и швейцарского национальных вариантов немецкого языка, при переводе на которые следует использовать термин ***Verpackung***, в австрийском национальном варианте нормой является термин ***Emballage***.

Иногда для получателя перевода оказывается важным не только употребление верной терминологии в национальном варианте, но и отсылка к определенной культуре.

Русский оригинал		
Исходные положения для маркировки знаком ***«Голубой ангел»*** *отдельных классов продукции содержатся в директивах RAL-UZ* [8. С. 37]		
Перевод		
Немецкий	**Австрийский***	**Швейцарский***
Die Voraussetzungen für die Markierung einzelner Produktklassen mit dem Umweltzeichen ***«Blauer Engel»*** *sind in den Anweisungen RAL-ZU zu finden*	*Die Voraussetzungen für die Markierung einzelner Produktklassen mit dem* ***deutschen Umweltzeichen «Blauer Engel»*** *sind in den Anweisungen RAL-ZU zu finden*	*Die Voraussetzungen für die Markierung einzelner Produktklassen mit dem* ***deutschen Umweltzeichen «Blauer Engel»*** *sind in den Anweisungen RAL-ZU zu finden*

Здесь в австрийском и швейцарском вариантах необходимо дать краткий комментарий, обозначив, что страной, в который применяется знак *«Голубой ангел»*, является Германия – ***mit dem deutschen Umweltzeichen «Blauer Engel»***.

Из нашего исследования следует, что выбор термина в каждом конкретном случае зависит от цели перевода, от национального варианта и от объекта перевода (в связи с национальной принадлежностью заказчика перевода).

Главной задачей переводчика при работе с текстами разных национальных вариантов немецкого языка является обеспечение коммуникации. Но следует подчеркнуть, что не менее важным представляется эквивалентность узусу ПЯ. Поэтому необходимо помнить, что перевод национально-окрашенных текстов – творческая процедура, требующая от переводчика не только знания законов и приемов переводоведения, но и высокого уровня культурной и страноведческой подготовки. При этом необходимой частью процесса перевода является работа со словарями.

Литература

1. *Ammon U.* Die deutsche Sprache in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Das Problem der nationalen Varietäten. Berlin : Walter de Gruyter, 1995.

2. Deutsche Aussprache: Reine und gemäßigte Hochlautung mit Aussprachewörterbuch / Red. Theodor Siebs. Walter de Gruyter, 1969.

3. Duden. Das große Wörterbuch der deutschen Sprache: in 10 Bänden [Электронный ресурс]. URL: http://www.duden.de/.

4. *Koller W.* Einführung in die Übersetzungswissenschaft. Wiebelsheim, 2001.

5. Österreichisches Wörterbuch [Электронный ресурс]. URL: http://www.oesterreichisch.net/.

6. Schweizer Schülerduden. Rechtschreibung [Электронный ресурс]. URL: http://www.duden.de/.

7. Химический журнал. 2013. № 4.

8. Брошюра компании ЭГГЕР. 2013.

9. *Влахов С., Флорин С.* Непереводимое в переводе. М., 1980.

10. *Латышев Л.К.* Технология перевода : учебное пособие по подготовке переводчиков (с немецкого языка). М. : НВИ-Тезаурус, 2000.

11. *Сапожникова Г.П.* Конец «мусорной цивилизации»: пути решения проблемы отходов. М., 2010.

Обратимая системная дедифференциация при регрессии: шаг назад для движения вперед

Ю.И. Александров

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

Под регрессией обычно понимается понижение уровня организации поведения, возвращение его на более ранние стадии развития, к более ранним поведенческим моделям, «возвращение в детство». Феномены регрессии наблюдаются при стрессе, разнообразных заболеваниях, сильных эмоциях, при введении алкоголя. Цель нашего экспериментально-теоретического исследования состояла в том, чтобы выявить, какие закономерности динамики субъективного опыта и ее мозгового обеспечения лежат в основе феноменов, описываемых как регрессия и выявляемых при, казалось бы, весьма разнородных состояниях и воздействиях. Достижение этой цели осуществлено нами путем многоуровневого (от генетической и импульсной активности нейронов животных до поведения здоровых людей и людей, страдающих хроническим заболеванием) анализа динамики субъективного опыта в ситуациях, связываемых с регрессией. Ранее нами было установлено, что осуществление поведения обеспечивается посредством реализации новых, наиболее дифференцированных функциональных систем (элементов опыта), сформированных на сравнительно более поздних этапах развития, и одновременной актуализации множества более старых, менее дифференцированных систем, сформированных на более ранних этапах индивидуального развития. Нами были приведены теоретические и эмпирические аргументы в пользу того, что чем выше пропорция активных в реализующемся поведении элементов, принадлежащих низкодифференцированным системам, тем выше интенсивность эмоций.

В экспериментальных исследованиях мы обнаружили, что при остром введении алкоголя происходит регрессия, в основе которой лежит обратимая дедифференциация: относительное увеличение представленности в актуализированном опыте низкодифференцированных систем. При анализе вариабельности сердечного ритма было обнаружено, что сложность организации поведения под действием алкоголя достоверно понижается; это, в частности, манифестируется уменьшением межиндивидуальных различий просоциального поведения людей, решающих моральные дилеммы в контроле и после приема алкоголя. При научении в условиях алкогольной регрессии меньше (поведенческий критерий) учитываются ошибки, возникающие в процессе обучения, а также в меньшей степени (нейрогенетический критерий: анализ экспрессии ранних генов), чем в контроле, выражено вовлечение корковых областей мозга (в которых мы обнаружили ранее много нейронов наиболее дифференцированных систем) как в формирование новых элементов опыта, так и в «подстройку» (реконсолидационную) имеющегося опыта к добавлению новых элементов при научении.

Нами экспериментально показано, что в состоянии стресса люди регрессируют к более ранним, «детским» формам поведения, что выражается в предпочтении ими стратегии поддержки «своего», даже если он поступает несправедливо. Однако организация этих форм поведения у взрослых в состоянии стресса отличается от организации поведения у детей. Опыт как целостная структура содержит в каждом элементе в той или иной степени «следы» других элементов, отражающие сформированные при научении межсистемные связи. Следовательно, даже в случае наиболее выраженной регрессии полностью «вычесть» новый опыт и вернуться к состоянию бывшему до его формирования на предыдущих этапах развития невозможно.

Особенностью научения в ситуации стрессовой регрессии (как и при алкогольной интоксикации) является обратимая дедифференциация, выражающаяся в уменьшении активности корковых структур. При длительном существовании стрессирующего влияния, обусловленного течением болезни, индивидуальное развитие приобретает форму увеличения доменоспецифичной дифференцированности систем (т. е. более выраженное повышение дифференцированности в одном домене опыта по сравнению с другими); она связана с формированием поведения, направленного на достижение специфических для состояния болезни адаптивных результатов.

Результаты экспериментов, проведенных нами на математической модели, соответствуют предположению об обратимой дедифференциации как об одном из механизмов увеличения эффективности научения в стрессовой ситуации. Обнаружено, что происходящая при стрессе дедифференциация достоверно ускоряет научение в новой для индивида «стрессовой» проблемной области за счет того, что «деактивируется» имеющийся опыт и решение «фокусируется», сразу обращаясь к поиску новых для индивида способов.

Наше исследование и анализ литературы выявляют сходство ряда закономерностей развертывания стресса, научения, развертывания высокоэмоциональных состояний, болезни и алкогольной интоксикации. Сходство этих состояний заключается в происходящей дедифференциации, суть которой состоит в том, что при стрессе и повышении интенсивности эмоций, как и при введении алкоголя, наблюдается уменьшение сложности организации поведения.

Имеются аргументы в пользу того, что стресс и научение тесно взаимосвязаны и их основу составляет развертывание системогенеза на фоне более или менее длительной и более или менее выраженной дедифференциации. Вместе с тем имеется существенное различие между стрессом и «обычным» научением, хотя в обоих случаях происходит начальное повышение эмоциональности и изменение соотношения высоко- и низкодифференцированных систем в пользу последних. При «обычном» научении использование ранее созданных моделей поведения может быть часто изменено за счет их некоторого усовершенствования, дополнительной дифференциации имеющегося опыта, т. е. за счет формирования следующей, еще более дифференцированной системы, «наслаивающейся» на уже существующие системы высокого уровня дифференциации и еще больше повышающей дифференцированность ранее сформированного домена опыта. В некоторых же ситуациях, в том числе стрессогенных, новизна и эмоциональность которых особенно выражена, необходимо построение модели de novo или почти de novo. Для такого построения трудно использовать дополнительную дифференциацию в рамках прежних моделей, а сама новая модель предполагает реорганизацию существующих доменов. Поэтому, хотя дифференциация в индивидуальном развитии и происходит, но результирующая дифференцированность вновь созданных моделей в случае эффективной адаптации к стрессовым условиям оказывается сравнительно низкой, феноменологически «детской». Научение в той или иной мере включает в себя стресс, а стресс – научение, и в этих ситуациях (вернее, в этой ситуации индивидуального развития, имеющей разную выраженность стрессорного компонента) есть дедифференциация, селекция и реконсолидация. Существенно, однако, то, насколько выражен стрессорный компонент, какова глубина и длительность дедифференциации. При большой новизне ситуации и начале системогенетических процессов в новом (или малодифференцированном) домене опыта дедифференциация эффективна тем, что ускоряет формирование новых моделей адаптации.

Обратная сторона дедифференциационного процесса (подавление актуализации ранее сформированных систем) состоит в том, что уменьшается роль этих систем в формировании первых проб нового поведения, а также подавляется процесс селекции активированных нейронов для реконсолидационных модификаций старого опыта и для образования новых специализаций. Это проявляется, как показано нами, в подавлении по сравнению с «обычным» научением генетической активации нейронов при стрессовой и алкогольной дедифференциации. Данные «минусы» в ситуации выраженного стресса могут компенсироваться отставленным формированием дополнительных, более дифференцированных систем во вновь сформированном домене; при этом человек лучше преодолевает негативные последствия стресса. Но если говорить о ранних эффектах дедифференциации, то, по-видимому, существуют ее оптимальные уровни, уже повышающие скорость и эффективность научения, но еще не обусловливающие появление слишком выраженных ее «минусов» (U-образная зависимость между эффективностью формирования опыта и выраженностью стресса).

В то же время имеются данные о том, что сразу после стрессового воздействия эффект подавления актуализации памяти может быть не выражен, но через полчаса он проявляется и не исчезает после возвращения уровня кортизола к фоновому уровню. При этом эффект может не распространяться на «сильную» память. Возможно, подобная организация стрессового эффекта обусловлена эволюционно отобранной стратегией формирования адаптационного поведения. Первое, что происходит при возникновении стрессовой ситуации, – срочная активация имеющейся у индивида памяти для ее использования в возникшей ситуации. Здесь блокада памяти и активности корковых структур была бы неполезна. Наоборот, полезно было бы увеличение мозговой активации, захватывающей как подкорковые, так и корковые структуры, в попытке обнаружить в опыте и актуализировать подходящую модель целостного взаимодействия со средой, которое может служить разрешению стрессовой ситуации. Если после ряда подобных попыток разрешение не наступает («подходящего» опыта нет), необходимым оказывается формирование нового опыта, для ускорения чего, как уже говорилось, эффективна обратимая дедифференциация, связанная с частичной блокадой памяти. По-видимому, в первую очередь – реже используемой, менее значимой для субъекта, т. е. менее «сильной».

Регрессия проявляется и в структуре коллективной памяти, в культуре, выступая как архаизация – процесс упрощения, примитивизации социокультурной системы, сдвиг ее к более ранним формам. Предполагается, что этот процесс может иметь адаптационный характер, являясь не деструкцией, сломом, а социальным механизмом, обеспечивающим выживание за счет, как правило, временного упрощения.

Возможно, именно системогенетическое («развитийное») значение дедифференциации, феноменологически описываемой как регрессия и являющейся общим механизмом перестройки взаимодействия организма со средой в разных ситуациях, в которых прошлые модели поведения стали малоэффективными, оказывается наиболее существенным фактором не только закрепления ее в эволюции как компонента стрессовой адаптации, но и вообще ее возникновения в тех ситуациях, которые предполагают формирование новых и масштабную модификацию имеющихся адаптаций в условиях изменения внешней и/или внутренней среды.

Важно подчеркнуть, что предложенное представление о регрессии не просто объединяет ряд разных процессов и состояний общим объяснени-

ем, но и дает это объяснение в терминах развития. Это важно не только потому, что идея развития (как индивидуального, так и исторического) принадлежит к ядру развиваемого нами на протяжении многих лет системно-эволюционного подхода. Но и потому, что эта идея заложена В. Вундтом в самые основания экспериментальной психологии. Говоря более столетия назад о психологии как области исследования, Вундт подчеркивал, что если удастся в этой области подвести факты под законы, то эти законы удовлетворят нас только в том случае, если они будут носить характер законов развития. Мы полагаем, что наши исследования регрессии – еще один шаг на пути к формулировке этих законов.

Поддержано Российским научным фондом (грант № 14-28-00229).

Естественный билингвизм как нелинейная самоорганизующаяся система

Н.Ш. Александрова

Sprachbrücke e.V. Berlin

Данная работа – набросок приложения понятийного аппарата теории самоорганизующихся систем [1–4] к феномену естественного билингвизма. Основой для работы, кроме анализа литературы, являются многолетние и многочисленные наблюдения становления и функционирования естественного билингвизма у лиц разного возраста и их анализ.

Деление билингвизма на естественный и искусственный опирается, прежде всего, на различные способы приобретения второго языка – в языковой среде (натуральный путь, т. е. непроизвольное освоение через контакты с носителями языка) и при помощи формальных инструкций (логический путь, осознанное изучение). Два пути освоения языка, в свою очередь, являются проявлением двух стратегий обработки информации человеческим мозгом, двух различных когнитивных механизмов, двух различных видов памяти (процедурной и декларативной), которые включаются в зависимости от условий подачи языкового материала [5, 6].

Базовым для данной работы является представление о компонентах системы вербальной коммуникации – имплицитная лингвистическая компетенция (фонология, морфология, синтаксис и лексикон), металингвистические знания, прагматика и мотивация, которые обеспечиваются различными мозговыми механизмами и структурами и в норме пребывают в состоянии динамического взаимодействия [5, 7].

Взгляд на человеческий язык как на динамическую самоорганизующуюся систему [8–14] заставляет по-новому осмыслить явления, наблюдаемые при становлении языковой системы у детей в одноязычной и многоязычной среде. Есть основания полагать, что становление имплицитной лингвистической компетенции и ее пожизненное функционирование (т. е. освоение и пользование родным языком или языками при естественном билингвизме) протекает по законам самоорганизующихся динамических систем.

При одноязычном воспитании постоянное совершенствование языка ребенка воспринимается как естественный ход вещей: так, за пониманием обязательно следует становление разговорной речи и т. п., остановка или регресс языкового развития возможны лишь при тяжелой болезни. Здоровые дети в одноязычной среде могут забыть лишь некоторый выученный материал, например стихи. В многоязычной среде фоссилизация (остановка развития) одного из языков или языковые аттриции (стирание языка) – обычное явление. То есть помещение ребенка в двуязычную среду отнюдь не запускает второй импульс развития языка, и становление двух языков не является простым линейным соразвитием двух лингвистических систем. Ранний естественный билингвизм – самоорганизующаяся система взаимодействия двух имплицитных самоорганизующихся языковых систем.

Естественный би(поли)лингвизм – ответ когнитивных механизмов на длительно сохраняющуюся необходимость общаться на двух или нескольких языках. Под влиянием этой необходимости происходит биологическая адаптация, которая, как и чисто природные адаптации, имеет возвратный механизм – языковые аттриции (непатологическое стирание языка). *Начальное условие* самоорганизации естественного билингвизма можно определить как *социально-биологическое*, так как запрос социума является решающим для возникновения и функционирования данного явления.

Аттрактор – потенциальное состояние системы, к которому она эволюционирует. В развитии любого живого существа это, прежде всего, *осуществление генетической программы.* Импульс к развитию отдельного организма – это то, что заставляет оплодотворенную яйцеклетку делиться, а ребенка – родиться, вставать на ножки и осваивать язык. Л.С. Выготский предлагает периодизацию развития ребенка как чередование стабильных и критических периодов [15]. Накопление мельчайших количественных изменений развития сменяется скачкообразными необратимыми изменениями в критические периоды. Легко увидеть в этой периодизации *русла и кризисы-джокеры теории нелинейных систем*.

В развитии речи есть свои русла спокойного накопления изменений и кризисы-джокеры. Так, период до начала фразовой речи можно считать спокойным руслом: вслед за гулением наступает фаза лепета, начинается формирование импрессивной стороны речи, появляются первые осмысленные слова и словосочетания. Все эти приобретения происходят почти в одно и то же время у всех здоровых детей. Но переход к фразовой речи, который можно отнести к критическому периоду, чрезвычайно разнообразен: норма начала фразовой речи охватывает целый год – от полутора до двух с половиной лет (на практике этот диапазон шире), причем дети в этот период используют различные стратегии освоения языка. Далее, когда ребенок заговорил фразами, наступает следующий спокойный период становления языковой функции, который завершается с началом освоения грамоты. В условиях двуязычия периоды кризиса являются наиболее драматичными для становления языковой функции.

При необходимости понимать два или несколько языков появляются дополнительные биологические, природные (т. е. не связанные с жела-

нием, мотивацией и т. п.) аттракторы: *стремление обеспечить вербальную коммуникацию на всех необходимых для общения языках* и *стремление к одноязычию*, которые действуют в противоположных направлениях и значительно усложняют траекторию развития системы по направлению к основному биологическому аттрактору – *стремлению к освоению языка согласно генетической программе.*

Стремление обеспечить вербальную коммуникацию на всех необходимых языках эволюционно можно объяснить исходя из теории Леннеберга [16]: коммуникация на родном языке, как и ходьба, является специфическим, т. е. обязательным поведением вида Homo sapiens, в то же время многие навыки (грамота, акробатика и т. п.) не являются обязательными для человека и приобретаются благодаря пластичности или не приобретаются. Логично предположить, что вербальная коммуникация, как обязательное видовое поведение, должна обеспечиваться при смене языковой среды и при необходимости общения на нескольких языках, поэтому и сформировался механизм биологической адаптации – естественный билингвизм. Количество осваиваемых языков при естественном билингвизме не ограничено.

Стремление к одноязычию, вероятно, связано со стремлением системы к экономии энергии: один из двух языков у билингва, если общение на нем сокращается, будет обедняться и может полностью исчезнуть (непатологическое стирание языка, или языковые аттриции). Этот механизм уравновешивает неограниченную возможность осваивать новые языки: природа позволяет осваивать новое, но стирает то, что становится менее нужным. Легкость, с которой при многоязычном воспитании все языки сверх одного могут быть утрачены, показывает, что естественный билингвизм является для природы лишь *временным ответвлением* (spin-offs) от устойчивой программы одноязычного развития.

Стремление к освоению языка согласно генетической программе, стремление обеспечить вербальную коммуникацию на всех необходимых языках и стремление к одноязычию (лебедь, рак и щука) – развитие языков у ребенка в многоязычной среде происходит между этими стремлениями, чутко реагирует на любое изменение в балансе языков и непредсказуемо. Вероятно, это и есть проявление странного аттрактора (strangeattractor), так как конечное состояние процесса остается неопределенным и постоянно меняется. Естественный билингвизм, таким образом, предстает как стабильно-нестабильное состояние языковой системы.

Фракталы – типичное явление самоорганизации любой сверхсложной системы. Стремление к одноязычию, которое ярко проявляется на поведенческом уровне [6], можно проследить и внутри языка при языковых контактах (языковая интерференция), а также при смене поколений в условиях миграции: для первого поколения мигрантов родным и ведущим является язык страны, из которой они выехали, второе поколение вырастает двуязычным и использует два языка, а для третьего поколения ведущим становится новый язык [17]. В течение столетий может происходить переход от менее распространенного языка через коллективный билингвизм к более распространенному языку. Вероятно, так и проявляются фракталы – подобные себе (self-similar) и самосодержащие (self-containing) структуры в любом масштабе меньше и больше рассматриваемой формы.

Несложно проследить и другие проявления стремления системы к одноязычию как к менее энергозатратной форме, которые характерны как для индивидуального, так и для коллективного билингвизма: например, два языка занимают различные ниши как в жизни отдельного билингва, так и в жизни двуязычного социума, а усиление позиций одного из языков неизбежно ведет к ослаблению второго как при становлении естественного билингвизма у детей, так и при коллективном билингвизме. Для сохранения (поддержания) естественного билингвизма как у человека, так и у коллектива нужна энергия социума, т. е. педагогическое сопровождение детей-билингвов [18] и программы на уровне государства. Этот факт согласуется с теорией диссипативных систем.

Хранителями языков являются монолингвы, т. е. лица, имеющие один родной язык (иностранных языков при этом может быть как угодно много). Пока существует достаточное количество монолингвов, языку не угрожает исчезновение. Естественный билингвизм в любых проявлениях и масштабах – явление неустойчивое, это мостик между языками и культурами со стремлением к устойчивому одноязычию. То есть это сверхсложная система, возникающая (самоорганизующаяся) при необходимости осуществлять коммуникацию на двух языках, функционирующая по своим законам (а законы эти нужно изучать, понимать и учитывать), чутко реагирующая на любые изменения в количестве и качестве языков вокруг ребенка и в многоязычном сообществе в целом и в то же время стремящаяся сбросить груз всех языков сверх одного и вернуться к устойчивой, более экономной по затратам энергии, одноязычной программе. Иными словами, законы функционирования билингвизма как сверхсложной системы – сила, которая распоряжается процессом овладения двумя языками независимо от учителей и родителей и, иногда, вопреки их стараниям. Также и языковая политика государства без учета стремлений самоорганизующейся системы не может быть успешной.

Естественный билингвизм раскрывает языковую систему в целом как динамичную, способную к самореорганизации и стремящуюся к экономному функционированию.

Литература

1. *Prigogine I.* From Being To Becoming. N. Y. : W.H. Freeman, 1980.

2. *Prigogine I., Stengers I.* Order out of Chaos : Man's new dialogue with nature. Flamingo, 1984.

3. *Nicolis G., Prigogine I.* Exploring complexity: An introduction. N. Y. : W.H. Freeman, 1989.

4. *Mosko M., Damon F*. On the Order of Chaos. Washington : Berghann Books, 2005. 276 p.

5. *Paradis M.* A Neurolinguistic Theory of Bilingualism. Amsterdam ; Philadelphia : John Benjamins, 2004.

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

7. *Ellis N.C.* At the interface: dynamic interactions of explicit and implicit language knowledge // Studies in Second Language Acquisition. 2005. V. 27, Iss. 2. P. 305–352. DOI: http://dx.doi org/10.1017/S027226310505014X.

8. *Mitchener W.G., Nowak M.* Chaos and language // Proc. Biol. Sci. 2004. V. 271(1540). P. 701-4.

9. *De Bot K., Lowie W., Verspoor M.* A Dynamic Systems Theory approach to second language acquisition // Bilingualism: Language and Cognition. 2007. V. 10 (1). P. 7–21. DOI:10.1017/S1366728906002732.

10. *Larsen-Freeman D.* Research methodology in language development from a complex systems perspective // The Modern Language Journal. 2008. V. 92, № 2. P. 200–213.

11. *Ellis N., Larsen-Freeman D*. (eds) Language as a Complex Adaptive System. Michigan : University of Michigan, 2009. 200 p.

12. *Мильруд Р.П.* Развитие языка в онтогенезе как игра хаоса // Мир психологии. 2012. № 2. С. 63–76.

13. *Schmid M., Köpke B., de Bot K.* Language attritionas a complex, non-linear development // International Journal of Bilingualism. 2013. V. 17, № 6. P. 675–682.

14. *Schmid M., Lowie W*. (eds) Modeling Bilingualism: From Structure to Chaos. Amsterdam ; Philadelphia : John Benjamins, 2011.

15. *Выготский Л.С.* Собрание сочинений. М., 1984. Т. 4. 433 с.

16. *Lenneberg E.* Biologische Grundlagen der Sprache. Frankfurt : Suhrkamp, 1972.

17. *Appel R., Muysken P.* Language contact and bilingualism. London ; Baltimore : Edvard Arnold, 1987.

18. *Выготский Л.С*. К вопросу о многоязычии в детском возрасте // *Выготский Л.С.* Умственное развитие детей в процессе обучения. М. ; Л., 1935. С. 566–573.

О глобальной линеаризации и связи оператора Купмана – Карлемана с нейросетями

А.К. Алексеев

РКК «Энергия», г. Королев; МФТИ, г. Долгопрудный, Московская область

В настоящее время численные алгоритмы, разработанные для линейных задач, достигли большого совершенства. Их самым существенным недостатком является то, что большинство проблем в природе и технике являются нелинейными. Нелинейность же вызывает принципиальные сложности и приводит к очень затратным с вычислительной точки зрения алгоритмам.

При этом системы управления в живой природе справляются с задачами предсказания нелинейной сопряженной динамики и аэродинамики по крайней мере не хуже автопилота (вряд ли кто видел комара, промахнувшегося мимо посадочной полосы, или непреднамеренное столкновение ворон в полете), несмотря на абсолютно несопоставимые скорости передачи информации в живой системе и в электронике (в качестве иллюстрации можно представить процессор с тактовой частотой порядка 100 Гц).

Естественно, что идея использования нейронных сетей для анализа нелинейных систем [1, 2] существует и имеет определенные успехи.

Возможно также, что нейронные сети могут реализовать потенциал глобальной линеаризации, связанный с оператором Купмана и линеаризацией Карлемана, и позволяют использовать мощь линейных методов в нелинейном прогнозе.

Ниже мы рассмотрим связь оператора Купмана с нейронными сетями.

Глобальная линеаризация

Достаточно давно существует гипотеза, что нелинейная динамическая система эквивалентна некоторой бесконечно-мерной линейной системе [3, 4]. По этой гипотезе, динамическая система, описываемая нелинейными дифференциальными уравнениями

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = N(\vec{u}) \tag{1}$$

и, соответственно, оператором эволюции (пропагатором), для некоторого временного интервала Δt имеющим вид

$$\vec{u}_{k+1} = A_{NL}(\vec{u}_k, \Delta t)\ ,\ \vec{u} \in R^M\ , \tag{2}$$

эквивалентна некоторой линейной системе

$$\frac{d\vec{\psi}}{dt} = B\vec{\psi} \tag{3}$$

и оператору эволюции

$$\vec{\psi}_{k+1} = L \cdot \vec{\psi}_k\ ,\quad \vec{\psi} \in R^{\infty}\ , \tag{4}$$

где $L(\Delta t)$ – оператор Купмана [3, 5].

Формальным методом построения оператора Купмана в полиномиальном случае является линеаризация Карлемана [4], однако практические реализации этого подхода осуществимы лишь в маломерном случае.

DMD

Совсем недавно возник метод разложения по динамическим модам (Dynamic Mode Decomposition (DMD)) [5–8], обеспечивающий построение оператора Купмана в линейном (конечном) словаре по некоторому последовательному набору срезов (состояний системы в последовательные моменты времени). Этот метод применим к системам большой размерности, возникающим при аппроксимации систем уравнений в частных производных (ЧДУ).

Пусть у нас есть пропагатор $A(\Delta t) \in R^{M \times M}$, такой, что $\vec{u}_{i+1} = A\vec{u}_i$, $\vec{u} \in R^M$. Этот пропагатор может быть неявно реализован с помощью решения системы ЧДУ. Тогда срезы представляют последовательность Крылова

$$Sn_1^{N+1} = \{\vec{u}_1, A\vec{u}_1, A^2\vec{u}_1, ..., A^N\vec{u}_1\}\ , \tag{5}$$

из которой выделим два набора срезов

$$X = \{\vec{u}_1, ..., \vec{u}_N\} \tag{6}$$

и

$$Y = \{\vec{u}_2, ..., \vec{u}_{N+1}\} = AX\ , \tag{7}$$

$X,\ Y \in R^{M \times N}$.

Послойно $\vec{y} = A\vec{x}$, $\vec{x} = \vec{u}_i$, $\vec{y} = \vec{u}_{i+1}$.

Формально из $Y = AX$ можно получить оператор эволюции в виде

$$A = Y \cdot X^+\ , \tag{8}$$

где $X^+ = (X^*X)^{-1}X^*$ – псевдообратная матрица. Однако этот подход не позволяет построить оператор в сжатой форме, и результат потребует огромной памяти для своего хранения.

DMD же позволяет определить сжатую форму пропагатора

$$A_r = \Omega_R^A \Lambda \Omega_L^A \tag{9}$$

с помощью специального высокоэффективного (с точки зрения как памяти, так и объема вычислений) алгоритма, использующего прямоугольные матрицы меньшего размера $\Omega_R \in R^{M \times N}$, $\Omega_L \in R^{N \times M}$, $\mathrm{diag}(\Lambda) \in R^N$.

В простейшем случае динамика определяется для фиксированного временного шага Δt. Однако, хотя и с дополнительными сложностями [8], возможно определение матрицы Λ для произвольного шага по времени в форме

$$\Lambda_{jj} = \lambda_j = \mathrm{e}^{(\sigma_j + i\omega_j)\tau}\ . \tag{10}$$

Таким образом, DMD позволяет определить аппроксимацию истинной динамики неизвестной системы, исходя из набора наблюдений.

Интересно, что для весовых коэффициентов линейного нейрона без скрытых ячеек и при наблюдении фазовых переменных известно [11] точно такое же выражение, как (8):

$$W = Y \cdot X^+\ . \tag{11}$$

Таким образом, такой линейный нейрон аналогичен пропагатору, получаемому с помощью DMD, и также способен аппроксимировать эволюцию линейной системы.

EDMD

В своем первоначальном варианте метод DMD является линейным, что существенно ограничивает его возможности. В качестве попытки расширения DMD на нелинейные задачи разработан метод EDMD [9, 10], обеспечивающий построение оператора Купмана в нелинейном (возможно, бесконечном) словаре.

Ключевым элементом для численной реализации EDMD является kernel trick. В соответствии с ним выбирается нелинейный словарь (набор нелинейных функций от $\vec{u} \in R^M$) $\{\psi_1(\vec{u}),...,\psi_L(\vec{u})\} \in R^L$ длиной $L >> M$ и формируются набор векторов $\vec{\psi}(\vec{u}_i) = \{\psi_1(\vec{u}_i),...,\psi_L(\vec{u}_i)\}^L$, $i = 1,...,N+1$, из которых создается матрица срезов в выпрямленном (нелинейном) пространстве

$$\Psi = \{\psi(\vec{u}_1),...,\psi(\vec{u}_{N+1})\}^L . \quad (12)$$

Этот набор $N+1$ срезов позволяет сформировать наборы $\Psi_X, \Psi_Y \in R^{L\times N}$ (функций от $X, Y \in R^{M\times N}$).

Аналогично DMD предполагаем существование линейного оператора $A_{kj} \in R^{L\times L}$, такого, что $\Psi_Y = A\Psi_X$. Он является аппроксимацией (укороченной частью) оператора Купмана $\Psi_Y = L\Psi_X$ – см. уравнение (4).

Послойно определим $\vec{\psi}_y = A\vec{\psi}_x$, $\vec{\psi}_x = \vec{\psi}(\vec{u}_i)$, $\vec{\psi}_y = \vec{\psi}(\vec{u}_{i+1})$.

Такое определение пропагатора неприменимо практически из-за высоких требований к объему памяти. Пропагатор $A = \Psi_Y \Psi_X^+$ имеет также другую форму, полезную при исследовании его спектра через спектр сопровождающей матрицы

$$A = HG^+ \in R^{L\times L}, \quad (13)$$

где $H = \Psi_Y \Psi_X^*$ и $G = \Psi_X \Psi_X^*$ – грамианы, и $A = \Psi_Y \Psi_X^+ = \Psi_Y \Psi_X^* (\Psi_X \Psi_X^*)^+$.

Использование грамианов позволяет применить в EDMD метод ядра (kernel trick). Для этого надо выбрать словарь функций так, чтобы их скалярное произведение соответствовало значениям некоторой функции двух переменных (функции ядра)

$$(\vec{\psi}(\vec{u}_j), \vec{\psi}(\vec{u}_i)) = \psi_k(\vec{u}_j)\psi_k(\vec{u}_i) = f(\vec{u}_i, \vec{u}_j). \quad (14)$$

В таком случае можно генерировать матрицы $\tilde{G}_{ij} = f(\vec{x}_i, \vec{x}_j)$ и $\tilde{H}_{ij} = f(\vec{y}_i, \vec{x}_j)$, используя функцию ядра f вместо скалярного произведения, что позволяет радикально сократить объем вычислений.

В качестве иллюстрации расширим пространство наблюдений до полиномов степени α и используем ядро

$$f(\vec{z}, \vec{v}) = (1 + \vec{z}\vec{v})^\alpha = (1 + z_i v_i)^\alpha . \quad (15)$$

Например, в двумерном случае $\vec{z}, \vec{v} \in R^2$ ядро

$$f(\vec{z}, \vec{v}) = (1 + \vec{z}\vec{v})^2 = (1 + z_1 v_1 + z_2 v_2)^2 =$$
$$= (1 + 2z_1 v_1 + 2z_2 v_2 + 2v_1 v_2 z_1 z_2 + z_1^2 v_1^2 + z_2^2 v_2^2)$$

позволяет экономно рассчитывать скалярное произведение $f(\vec{z}, \vec{v}) = (\vec{\psi}(\vec{z}), \vec{\psi}(\vec{v}))$, в шестимерном пространстве

$$\vec{\psi}(\vec{v}) = \{1, \sqrt{2}v_1, \sqrt{2}v_2, v_1 v_2, v_1^2, v_2^2\} \in R^6 .$$

При дальнейшем росте размерности пространства динамических переменных или степени полинома эффективность этого подхода резко растет.

EDMD имеет аналогии с проблемами распознавания образов в нелинейном пространстве признаков («спрямляющем пространстве»), в том числе и с точки зрения использования ядер (kernel trick) [12, 13].

Строго говоря, полное построение пропагатора EDMD $\Psi_Y = A\Psi_X$ на нелинейном словаре от динамических переменных исключительно затратно с точки зрения памяти и практически невычислимо.

Однако линейная часть пропагатора A в форме EDMD может быть представлена достаточно компактно в размерности динамических переменных и числа срезов.

Запишем EDMD в виде $\vec{\psi}_y = A\vec{\psi}_x$ ($\psi_k(u_{i+1}) = A_{kj}\psi_j(u_i)$, $A_{kj} \in R^{L\times L}$).

Если существуют компоненты вектора $\vec{\psi}(\vec{u}_i) = \{\psi_1(\vec{u}_i),...,\psi_L(\vec{u}_i)\}^L$, соответствующие линейным по u_i членам, их можно сгруппировать с младшими индексами. Тогда нелинейную динамику можно описать в укороченном виде: $\vec{y} = W\vec{\psi}(\vec{x})$, $\vec{x} = \vec{u}_i$, $\vec{y} = \vec{u}_{i+1}$ ($y_i = W_{ij}\psi_j(\vec{x})$, $W_{mi} \in R^{M\times L}$).

Несмотря на то что $W_{mi} \in R^{M\times L}$ сокращена по сравнению с первоначальным видом $A_{kj} \in R^{L\times L}$, наличие в размерности переменной $L >> M$ попрежнему исключает ее практическую применимость. Аналогично [12, 13] разложим W_{mk} по нелинейному базису в виде

$$W_{mk} = \beta_{mi}\vec{\psi}_k(\vec{u}_i) . \quad (16)$$

В соответствии с [12] β_{mi} можно определить через

$$B = (G + \lambda E)^+ Y = (\Psi_X \Psi_X^* + \lambda E)^+ Y . \quad (17)$$

Теперь мы получаем еще одну форму оператора Купмана: $y = B\vec{\varphi}(\vec{x})$, которая оперирует с линейным выходом от нелинейного входа и в индексной форме имеет вид

$$y_m = \beta_{mi}\varphi_i(\vec{x}), \ \beta_{mi} \in R^{M\times N} . \quad (18)$$

Нелинейные базисные функции имеют вид $\varphi_i(\vec{x}) = (\psi_k(\vec{u}_i)\psi_k(\vec{x}))$, $i = 1,...,N$. Kernel trick позволяет в этом выражении заменить скалярное произведение на функцию ядра $(\psi_k(\vec{u}_i)\psi_k(\vec{x})) = f(\vec{u}_i, \vec{x})$, что делает вычисление базисных функций осуществимым.

Данная форма является одной из аппроксимаций оператора Купмана. $y = B\vec{\varphi}(\vec{x})$ позволяет сдвиг на Δt внутри набора срезов и один шаг вовне. При выходе за границы набора данных можно последовательно сдвигать набор базисных векторов.

Обсуждение

Как уже указывалось, DMD эквивалентен линейному нейрону $y_i = W_{ij}u_j$, $y_i \in R^M$, $u_i \in R^M$, $W_{ji} \in R^{M\times M}$ – весовая матрица. Линейный нейрон, в котором вход и выход соответствуют динамическим переменным, соответствует оператору линейной эволюции A_{ij}.

Соответственно, EDMD может аппроксимировать оператор нелинейной эволюции (оператор Купмана) в очень похожей форме: $y_i = W_{ij}\varphi_j(\vec{u})$. Поэтому кажется резонным соотнести EDMD с некоторым нелинейным нейроном.

Однако для перцептрона характерна нелинейная активационная функция $O_i = \dfrac{1}{1+\mathrm{e}^{w_{ij}y_j}}$, покомпонентно преобразующая вектор выходных параметров.

EDMD, в отличие от перцептрона, оперирует с линейным выходом от нелинейного входа. На входе используются нелинейные базисные функции, рассчитываемые с помощью kernel trick, запутывающего все компоненты входного вектора. При этом могут использоваться такие ядра, как рассмотренное выше полиномиальное ядро или сигмоид вида $K(u,v) = \tanh(\eta u\cdot v + \mu)$.

Литература

1. *Hsieh W.W., Tang B.* Applying neural network models to prediction and analysis in meteorology and oceanography // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1998. V. 79. P. 1855–1870.

2. *Kerschen G., Golinval J.-C., Vakakis A.F., Bergman L.A.* The Method of Proper Orthogonal Decomposition for Dynamical Characterization and Order Reduction of Mechanical Systems: An Overview // Nonlinear Dynamics. 2005. V. 41. P. 147–169.

3. *Koopman B.* Hamiltonian systems and transformations in Hilbert space // Proc. Nat. Academy of Sciences of the USA. 1931. V. 17. P. 315–318.

4. *Carleman T.* Application De La Théorie Des Équations Intégrales Linéaires Aux Systèmes D'Équations Différentielles NonLinaires // Acta Math. 1932. V. 59. P. 63–87.

5. *Rowley C.W., Mezic I., Bagheri S., Schlatter P., Henningson D.S.* Spectral analysis of nonlinear flows // Journal of Fluid Mechanics. 2009. V. 641. P. 115–127.

6. *Schmid P.J.* Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data // Journal of Fluid Mechanics. 2010. V. 656, № 1. P. 5–28.

7. *Alekseev A.K., Bistrian D.A., Bondarev A.E., Navon I.M.* On Linear and Nonlinear Aspects of Dynamic Mode Decomposition // Int. J. Numer. Meth. Fluids. 2016. V. 82, Iss. 6. P. 348–371.

8. *Alekseev A.K.* On Relationship of Koopman Eigenvalues and Frequencies in Dynamic Mode Decomposition. 2016. URL: arXiv:1603.06508.

9. *Williams M.O., Kevrekidis I.G., Rowley C.W.* A Data-Driven Approximation of the Koopman Operator: Extending Dynamic Mode Decomposition // J. Nonlinear Sci. 2015. V. 25. P. 1307–1346.

10. *Williams M.O., Rowley C.W., Kevrekidis I.G.* A Kernel Approach to Data-Driven Koopman Spectral Analysis. 2015. URL: arXiv:1411.2260v4.

11. *Tapson J., van Schaik A.* Learning the pseudoinverse solution to network weights // Neural Networks. 2013. V. 45. P. 94–100.

12. *Kashima H., Ide T., Kato T., Sugiyama M.* Recent Advances and Trends in Large-scale Kernel Methods // IEICE Transactions on Information and Systems. 2009. V. E92-D, № 7. P. 1338–1353.

13. *Jakel F., Scholkopf B., Wichmann F.A.* A tutorial on kernel methods for categorization // J. Math. Psychology. 2007. V. 51. P. 343–358.

Измерение стохастических свойств нейронных ансамблей головного мозга при интерпретации визуальных стимулов

А.В. Андреев[1], А.Е. Руннова[1], В.В. Макаров[1], В.В. Грубов[1], А.Н. Писарчик[1,2,3]

[1] Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
[2] Центр биометрических исследований, Технический университет Мадрида
[3] Центр исследования оптики, Гуанахуато

В настоящее время восприятие неоднозначных образов привлекает огромное внимание многих ученых. В некотором смысле такие образы являются хорошими объектами для изучения зрительного восприятия в целом, а также механизмов принятия решений. Изображения этого типа были предметом исследований для психологов в течение длительного времени [1, 2]. В последнее время неоднозначные образы пробудили интерес физиков и математиков [3, 4].

Шум может приводить к увеличению порядка в динамике системы. В доказательство этого можно упомянуть эффекты индуцированного шумом порядка в хаотических системах [5], синхронизацию внешним шумом [6–8]. Также была показана роль шума в качестве стабилизатора в ансамблях связанных осцилляторов и отображений [9]. Особенно интересным является явление стохастического резонанса, возникающего, когда нелинейная система одновременно подвергается воздействию как шума, так и периодического сигнала. И при определенных значениях амплитуды шума периодический отклик становится максимальным.

Интерес к математическому моделированию нейронной синхронизации значительно возрос после нейробиологических экспериментов с двумя электрически связанными нейронами [10], где были обнаружены различные синхронные состояния. Для того чтобы отразить кооперативную нейронную динамику, были разработаны численные модели, основанные на итерируемых отображениях или дифференциальных уравнениях с различной конфигурацией связи [10]. В зависимости от силы связи и длительности синоптической задержки связанные нейроны генерируют спайковые последовательности, которые происходят в одно и то же время, или демонстрируют пачечную активность с положительными или отрицательными задержками [11]. Когда в рассмотрение принимаются 3 или более нейронов, может быть реализовано большое количество конфигураций связи.

В работе проводится исследование простой нейронной модели, отображения Рулькова [12, 13]. Хотя эта модель не явно основана на физиологических процессах, происходящих в мембране, она способна генерировать невероятно сложную и довольно специфическую нейронную динамику (молчание, периодические спайки или хаотическая пачечная активность), воспроизводя таким образом большое число основных экспериментально наблюдаемых режимов [10, 12, 14], включая спайковую адаптацию [13], движение от режима молчания к пачечной активности посредством допороговых колебаний [15], фазовую и антифазовую синхронизацию с хаотической регулизацией [12, 16] и сложную и пачечную синхронизацию [17–19].

Каждый элемент Рулькова описывается следующей системой уравнений с синоптической связью [13]:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= f(x_n, x_{n-1}, y_n + \beta_n), \\ y_{n+1} &= y_n - \mu(x_n + 1) + \mu\sigma + \mu\sigma_n + \mu A^{\xi}\xi_n, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_n – быстрая переменная, связанная с мембранным потенциалом и отражающая взаимодействие «быстрых ионных токов», y_n – медленная переменная, которая моделирует динамическое «действие медленных ионных токов». Медленное изменение во времени переменной y_n обуславливается малостью параметра μ. Параметр σ задает невозмущенное состояние нейрона; ξ – гауссовский шум с нулевым средним и стандартным отклонением, равным 1; A^{ξ} – амплитуда шума; β_n и σ_n связаны с внешним стимулом; f – разрывная функция следующего вида:

$$f(x_n, x_{n-1}, y_n) = \begin{cases} \alpha/(1-x_n) + y_n, & x_n \le 0, \\ \alpha + y_n, & 0 < x_n \le \alpha + y_n \vee x_{n-1} \le 0, \\ -1, & x_n \ge \alpha + y_n \wedge x_{n-1} > 0. \end{cases} \quad (2)$$

Она построена таким образом, чтобы воспроизводить различные режимы нейронной активности, такие как генерация спайков, пачечная динамика и режим молчания; α является контрольным параметром отображения, параметры β_n и σ_n определяются как

$$\begin{aligned} \beta_n &= \beta^e I_n^{ext} + \beta^{syn} I_n^{syn}, \\ \sigma_n &= \sigma^e I_n^{ext} + \sigma^{syn} I_n^{syn}. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициенты β^e и σ^e используются для балансировки внешних токов I_n^{ext}; β^{syn} и σ^{syn} – коэффициенты синоптической связи; I_n^{syn} – синоптический ток:

$$I_{n+1}^{syn} = I_n^{syn} - g_{syn} * \begin{cases} (x_n^{post} - x_{rp}), & \text{spike}^{pre}, \\ 0, & \text{в противном случае}, \end{cases} \quad (4)$$

где g_{syn} – сила синоптической связи, $g_{syn} > 0$. Индексы *pre* и *post* соответствуют пресинаптическим и постсинаптическим переменным соответственно. Первое условие в (4) соответствует моменту генерации пресиноптического импульса (спайка) и определяется как $x_n^{pre} \ge \alpha + y_n^{pre} + \beta_n^{pre}$. Параметр γ – время релаксации синапса, $0 \le \gamma \le 1$. Он определяет часть синоптического тока, которая присутствует в следующей итерации; x_{rp} – обратный

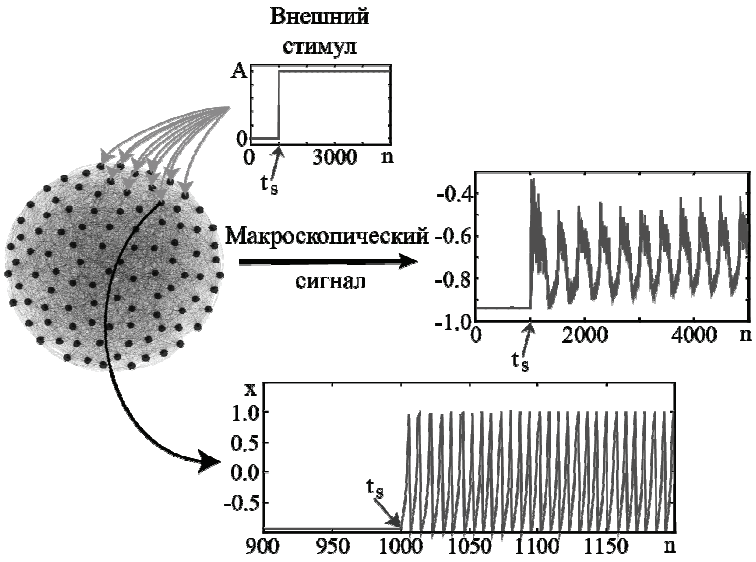


Рис. 1. Модель исследуемой системы из N отображений Рулькова, связанных каждый с каждым со случайной амплитудой связи. На часть нейронов подается внешний стимул амплитуды A, который возбуждает их. В результате со всех систем снимается усредненный макроскопический сигнал

потенциал, который определяет тип синапса: подавляющий или возбуждающий.

В моделировании значения параметров $\alpha = 3{,}65$, $\sigma = 0{,}06$, $\mu = 0{,}0005$ выбраны таким образом, чтобы каждый нейрон, будучи автономным, находился в режиме молчания (рис. 1). Также полагаются $\beta^e = 0{,}133$, $\sigma^e = 1{,}0$, $\beta^{syn} = 0{,}1$, $\sigma^{syn} = 0{,}5$ и $x_{rp} = 0{,}0$. Исследуемая система состоит из N нейронов, связанных каждый с каждым со случайной силой связи g_{syn} и временем релаксации γ. Их величина случайно выбирается из диапазона от 0,0 до 0,1 и от 0,0 до 0,5 соответственно. В исследуемой системе внешний стимул подается на Na нейронов. Он представляет собой импульс следующей формы: сначала он равен 0, в момент t_s, когда мы подаем стимул, он становится равным A. Значения параметров выбраны так, что при применении внешнего стимула к системе все нейроны начинают периодически генерировать спайки.

Для исследования динамики системы снимаются временные ряды быстрой переменной x с каждого нейрона, а также усредненный по всем нейронам макроскопический сигнал. На рисунке 1 изображен пример такого сигнала для системы из 100 нейронов, когда на 10 из них подается внешнее воздействие с амплитудой $A = 1{,}0$ при наличии шума амплитуды $A^{\xi} = 0{,}1$. На нем наблюдается эффект группировки. Он состоит в том, что при включении внешнего воздействия невозбуждаемые нейроны начинают то периодически генерировать спайки, то находиться в режиме молчания. На усредненном сигнале это отражается периодическим образованием всплесков.

Для анализа явления периодической группировки рассчитывались зависимости отношения сигнала к шуму (SNR) от амплитуды стимула A и шума A^{ξ}. SNR рассчитывается из спектра мощности усредненного сигнала как разность амплитуды основной частоты и амплитуды фонового шума [20].

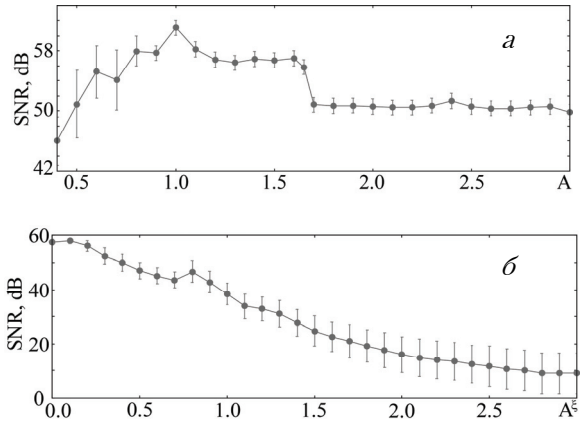


Рис. 2. Зависимости отношения сигнала к шуму (SNR) от амплитуды внешнего стимула A (*сверху*) при $A^{\xi} = 0{,}1$, $Na = 10$, $N = 100$ и от амплитуды внутреннего шума (*снизу*) при $A = 1{,}0$, $Na = 10$, $N = 100$

Был обнаружен эффект стохастического резонанса, когда для определенных значений амплитуды внешнего стимула отношение сигнала к шуму принимает максимальное значению. Это хорошо видно на рисунке 2, *а*, где в области значений амплитуды внешнего воздействия от 1,3 до 1,6 наблюдается резонанс. Для всех $A > 1{,}6$ SNR находится на одном уровне и не меняется. При уменьшении амплитуды внешнего стимула от 1,3 до 0 отношение сигнала к шуму также уменьшается вплоть до 0. Рисунок 2, *б* отражает влияние амплитуды шума на SNR. На ней наблюдается небольшой максимум при $A^{\xi} = 0{,}3$. Увеличение амплитуды шума от 0,3 до 3,0 приводит к плавному уменьшению отношения сигнала к шуму.

Для анализа стохастического резонанса была рассчитана такая его характеристика, как характерное время корреляции, которое определяется как [17]

$$\tau_c = \sum_{n_0}^{N} C(\tau)^2, \qquad (5)$$

где n_0 – число итераций переходного процесса, N – количество итераций, $C(\tau)$ – нормализованная функция автокорреляции, которая определяется как

$$C(\tau)=\frac{\left\langle \left(x(n)-\langle x\rangle\right)\left(x(n+\tau)-\langle x\rangle\right)\right\rangle}{\left\langle \left(x(n)-\langle x\rangle\right)^2\right\rangle}, \qquad (6)$$

где x – сигнал, усредненный по всем нейронам, $\langle x\rangle$ – усреднение по времени.

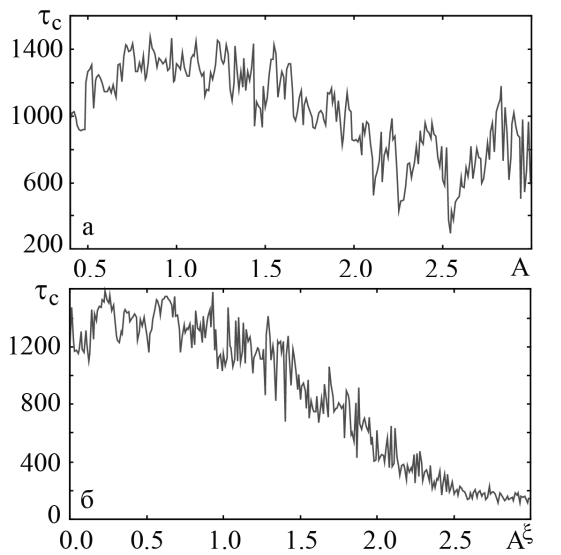


Рис. 3. Зависимости характерного времени корреляции от амплитуды внешнего стимула и внутреннего шума соответственно: *а* – A^{ξ} = 0,1; *б* – A = 1,0. Na = 10, N = 100

На рисунке 3 изображены зависимости характерного времени корреляции от амплитуды внешнего стимула и внутреннего шума. Видно, что поведение характерного времени корреляции полностью совпадает с поведением отношения сигнала к шуму. Подобная схожесть в поведении SNR и времени корреляции наблюдалась в работе [21].

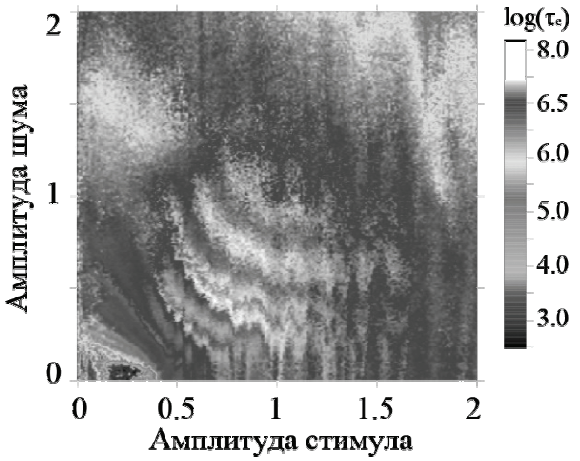


Рис. 4. Двухпараметрическая зависимость натурального логарифма характерного времени корреляции от амплитуды внешнего стимула A и внутреннего шума A^{ξ} при Na = 10, N = 100

На рисунке 4 изображена двухпараметрическая зависимость натурального логарифма характерного времени корреляции от амплитуды внешнего воздействия и внутреннего шума. На ней видна маленькая область при 0,3 < A < 0,4 и 0,0 < A^{ξ} < 0,2, где τ_c принимает наименьшие значения. Максимальные значения характерного времени корреляции обозначены белым цветом. Все эти значения расположены в области 0,4 < A < 1,7 и 0,0 < A^{ξ} < 1,3. Хорошо видно, что при увеличении амплитуды стимула амплитуда шума должна уменьшаться, чтобы τ_c оставалось максимальным. Тем самым обеспечивается эффект контроля внутреннего шума внешним стимулом.

Аналогичный эффект был обнаружен и при проведении следующего эксперимента по измерению внутреннего шума головного мозга человека. Испытуемому демонстрировался куб Неккера, оптическая иллюзия, впервые опубликованная в 1832 году швейцарским кристаллографом Луисом Неккером [22]. Он представляет собой рисунок из линий, который мозг интерпретирует как трехмерный куб. Но существуют две возможные ориентации этого мысленного куба, и обе они в равной степени совместимы с двумерным образом на бумаге. Вначале мы обычно видим одну из этих ориентаций, но если мы смотрим несколько секунд, то куб «перещелкивается» в мозгу, и мы видим другую очевидную ориентацию. Спустя еще несколько секунд мысленный образ «щелкает» обратно, и эти «перещелкивания» продолжаются, пока мы смотрим на картинку. Во время демонстрации куба прозрачность внутренних задних и передних граней непрерывно менялась от 0 до 100 % и от 100 % до 0 соответственно (рис. 5). Скорость изменения интенсивностей граней была выбрана такой, что по времени этот процесс занимал T = 30 с. Выбор данного значения времени был сделан исходя из того, что зависимость отношения момента времени первого перещелкивания τ к времени изменения куба T от скорости изменения интенсивностей граней приходит к насыщению при T = 30 [3].

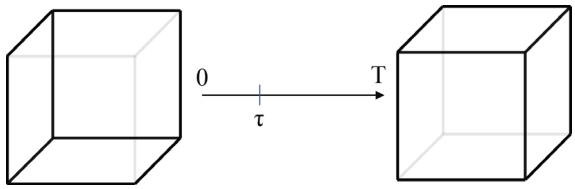


Рис. 5. Схема изменения интенсивностей внутренних граней куба Неккера за время T. Момент τ соответствует моменту переключения куба у наблюдателя с одного состояния на другое

В ходе эксперимента испытуемому предъявляются кубы Неккера, плавно переходящие от «левого» к «правому» или наоборот, что выбирается случайным образом, при этом цвет фона выбирается случайно из диапазона цветов от белого до 90 % черного с шагом в 7,5 %. Во время показа изменяющегося куба испытуемый нажимает на кнопку в тот момент, когда он видит самое первое переключение. После этого цвет фона меняется, и снова демонстрируется меняющийся куб и т. д.

Каждый фон демонстрировался по 10 раз. В результате эксперимента получались зависимости относительного параметра шума $\xi = T/\tau$ от интенсивности фона I. Некоторые из полученных зависимостей приведены на рисунке 6. На них хорошо видны моменты стохастического резонанса, когда при некотором значении внешнего стимула внутренний шум резко падает. Как видно, для разных людей значения амплитуды этого стимула разные, а величина, на которую происходит уменьшение шума, тем меньше, чем меньше максимальное значение шума, достигающееся у человека при других величинах внешнего стимула.

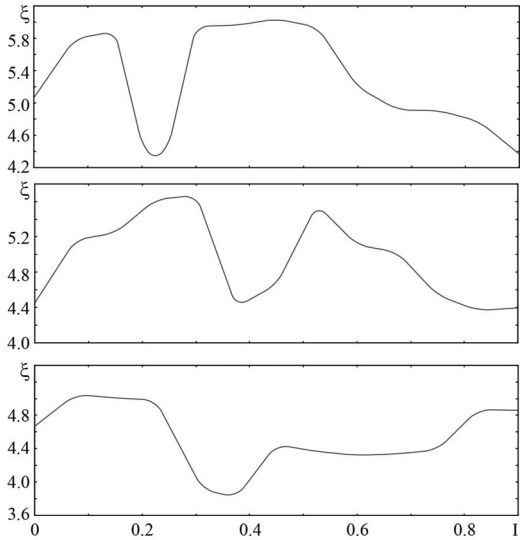


Рис. 6. Зависимости относительного параметра шума ξ от интенсивности фона для трех испытуемых

Авторы выражают благодарность А.Е. Храмову за плодотворные обсуждения в процессе проведения работы. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-12-10100).

Литература

1. *Leopold D.A., Logothetis N.K.* Multistable phenomena: changing views in perception // Trends in Cognitive Sciences. 1999. V. 3, № 7. P. 254–264.

2. *Sterzer P., Kleinschmidt A., Rees G.* The neural bases of multistable perception // Trends in Cognitive Sciences. V. 13, № 7. P. 310–318.

3. *Pisarchik A.N. et al.* Critical slowing down and noise-induced intermittency in bistable perception: bifurcation analysis // Biological cybernetics. 2014. V. 108, № 4. P. 397–404.

4. *Runnova A.E. et al.* Theoretical background and experimental measurements of human brain noise intensity in perception of ambiguous images // Chaos, Solitons and Fractals. 2016. V. 93. P. 201–206.

5. *Matsumoto K., Tsuda I.* Noise-induced order // J. Stat. Phys. 2011. V. 31. P. 87–106.

6. *Benzi R., Sutera A., Vulpiani A.* The mechanism of stochastic resonance // J. Phys. A. 1981. V. 14. P. 453–457.

7. *Jung P.* Periodically driven stochastic // Phys. Rep. 1993. V. 234. P. 175–295.

8. *Moss F., Pierson D., O'Gorman D.* Stochastic resonance: Tutorial and update // Int. J. Bifurcation Chaos. 1994. V. 4. P. 1383–1397.

9. *Hakim V., Rappel W.-J.* Noise-induced periodic behaviour in the globally coupled complex Ginzburg–Landau equation // Europhys. Lett. 1994. V. 27. P. 637.

10. *Elson R.C., Selverston A.I., Huerta R., Rulkov N.F.* [*et al.*] Synchronous behavior of two coupled biological // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 5692–5695.

11. *Lang X., Lu Q., Kurths J.* Phase synchronization in noise-driven bursting neurons // Phys. Rev. E. 2010. V. 82. P. 021909.

12. *Rulkov N.F.* Modeling of spiking-bursting neural behavior using two-dimensional map // Phys. Rev. E. 2002. V. 65. P. 041922.

13. *Rulkov N.F., Timofeev I., Bazhenov M.* Oscillations in Large-Scale Cortical Networks: Map-Based Model // J. Comp. Neuroscience. 2004. V. 17. P. 203–223.

14. *Elson R.C., Selverston A.I., Abarbanel H.D.I., Rabinovich M.* Inhibitory synchronization of bursting in biological neurons: Dependence on synaptic time constant // J. Neurophysiol. 2002. V. 88. P. 1166–1176.

15. *Shilnikov A., Rulkov N.F.* Subthreshold oscillations in a map-based neuron model // Phys. Lett. A. 2004. V. 328. P. 177–184.

16. *Rulkov N.F.* Regularization of synchronized chaotic bursts // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. P. 183–186.

17. *Shilnikov A., Gordon R., Belykh I.* Polyrhythmic synchronization in bursting networking motifs // Chaos. 2008. V. 18. P. 037120.

18. *Belykh I., de Lange E., Hasler M.* Synchronization of bursting neurons: What matters in the network topology // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. P. 188101.

19. *Wang H., Lu Q., Wang Q.* Bursting and synchronization transition in the coupled modified ML neurons // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat. 2008. V. 13. P. 1668–1675.

20. *Campos-Meja A., Pisarchik A.N., Arroyo-Almanza D.A.* Noise-induced onoff intermittency in mutually coupled semiconductor lasers // Chaos, Solitons and Fractals. 2013. V. 53. P. 96–100.

21. *Pikovsky A.S., Kurths J.* Coherence resonance in a noise-driven excitable system // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. P. 775–778.

22. *Necker L.A.* Observations on some remarkable optical phaenomena seen in Switzerland; and on an optical phaenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid // London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science. 1832. V. 5, № 1.

Ретроспектива как способ преодоления когнитивной слепоты

В.А. Антонец

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

Введение и постановка вопроса

Когнитивная слепота, т. е. неготовность к восприятию и анализу новых фактов, общепризнанное явление. Когнитивная слепота склоняет людей к игнорированию «странного». Она вызывает негативную реакцию и отторжение чужих идей, упаковывающих новые и старые факты в невиданную доселе конфигурацию, которая проверяется через подтверждение предсказанных ею следующих новых фактов. Обычно пока все не привыкнут, эта конфигурация противоречит текущему здравому смыслу. Так накопление знаний становится болезненным процессом. Не успеют всё (в жизни) «разумно» выстроить, привыкнуть и объявить выстроенное «естественным и единственно нормальным», как появляются новые знания, которые часто противоречат «устоям». Носители и пропагандисты этих новых знаний часто воспринимаются как диссиденты или горевестники со всеми вытекающими последствиями – вплоть до обращения на них репрессивных действий. Так проблема когнитивной слепоты приобретает еще и социально-политическое лицо. При этом одни хотят разобраться в проблеме, другие – замолчать ее, а наиболее многочисленным третьим все равно.

Очевидно, что для восприятия, осознания и встраивания новых знаний в картину мира требуются значительные интеллектуальные усилия, которые могут быть доступны лишь хорошо подготовленному и мотивированному уму. Поэтому не каждый способен и готов к открытиям, а их первая формулировка всегда дается большим и настойчивым трудом, значительной частью которого является поддержание мотивации к поиску решения. Обычно она обусловлена либо острым любопытством, либо настоятельной необходимостью. Литературные данные и жизненный опыт автора по наблюдению за процессом технологической гонки в науке и промышленности показывают, что мотивация творческого поиска повышается и гораздо легче поддерживается, если разработчики загнаны в угол или убеждены, что результат достижим. Поэтому можно ожидать, что управление мотивацией позволит влиять на уровень когнитивной слепоты. Не будем останавливаться на первом, испытанном многими на себе негативном способе, а обратимся к позитивному способу повышения уверенности в своих способностях решить задачу.

Предложение решения

Предлагаемый способ повышения мотивации и привнесения уверенности при решении сложных задач заключается в специальном мысленном упражнении. Оно состоит в том, что конструируется гипотетическая ситуация, когда несколько фактов, следующих из достоверно подтвержденных фундаментальных представлений и закономерностей, рассматриваются как результаты самостоятельных независимых наблюдений (измерений). При этом предполагается, что они выполнены наблюдателями, картина мира которых по тем или иным причинам не включает в себя эти самые достоверно установленные представления и закономерности. Далее оценивается интеллектуальная дистанция, которую должны преодолеть гипотетические наблюдатели для обобщения данных и коррекции своей картины мира. И поскольку «мы-то знаем, что дистанция преодолима», то чувство уверенности может распространиться и на ту задачу, которую мы пока еще не решили.

Пример конструирования

Хорошим, но заведомо не единственным источником конструирования гипотетических ситуаций является фольклор, сложившийся в условиях особенностей и ограничений, сопутствующих жизни его создателей.

В одной мадагаскарской сказке про путешествие трех братьев по поручению их отца есть примерно такая фраза: «Три дня шли они на запад, и запад кончился». Это означает, что братья вышли на берег океана. Из этого можно заключить, что мальгашские представления того времени об устройстве Земли, скорее всего, были сосредоточены на самом Мадагаскаре, окруженном бесконечной водой, про которую и говорить-то, что у нее есть запад, просто смешно, ну, или хотя бы бессмысленно, не прагматично. И уж точно, братьям и в голову не приходит, что Земля круглая. Однако, судя по содержанию той же сказки, их никак не назовешь глупыми. И я подумал: могли бы они каким-то образом, оставаясь на острове, окруженном водой, догадаться, что Земля круглая? Могли бы островитяне придумать физические опыты, подтверждающие эту догадку?

Итак, мы на плоском острове, окруженном бесконечной водой. Освоили каботажное плавание, т. е. такое, когда берега всегда видны. И вот обращаем внимание, что чем выше мачта паруса, тем больше времени, при прочих совпадающих обстоятельствах, тратит лодка от момента, когда мы с берега заметили ее парус, до момента, когда она причалила к берегу. Мотивов разбираться в таком пустяке вроде бы и нет. Но находится некто странный и упрямый, кого, как почти всех героев

мадагаскарских сказок – мужчин, будем титуловать Андриамбахуакой и писать с заглавной буквы, будто это имя. Этот титул часто переводится как «герой». После долгих тщательных наблюдений он достоверно устанавливает, что расстояние L, на котором с воды становятся видны на берегу макушки предметов разной высоты h подчиняется формуле

$$L \approx \sqrt[2]{D \cdot h}, \qquad (1)$$

где D – невообразимо большая постоянная величина, приблизительно равная $1{,}27 \cdot 10^7$ м, т. е. 12 700 км.

Он устанавливает также, что расстояние L, на котором с берега становится видна на горизонте макушка парусной мачты высотою h, подчиняется той же формуле (1).

Блестящий результат! Но упрямцу неймется, и, наблюдая за падением камней с разной высоты, он устанавливает вторую закономерность. Оказывается, ускорение свободно падающего тяжелого камня независимо от его веса направлено перпендикулярно плоскости острова и имеет постоянную величину $|g|$, приблизительно равную 9,8 м/с^2. Это было многократно проверено путем изучения зависимости длительности времени свободного падения t самых разных по тяжести камней от высоты h, с которой их сбрасывают. Она хорошо описывается формулой (здесь и далее знак модуля | | будем опускать)

$$t = \sqrt[2]{2h/g}. \qquad (2)$$

Из этого наш герой сделал заключение, что на все тела, имеющие вес, действует одна и та же причина, побуждающая их падать с одним и тем же ускорением. Но если весомое тело соприкасается с твердой неподвижной опорой, то и само остается на ней неподвижным, поскольку опора компенсирует причину, побуждающую тело падать.

Таким образом, наш Андриамбахуака установил две закономерности и соответствующие им константы D и g, которые в его картине мира, безусловно, являются фундаментальными.

Но упрямому гению всё мало! Он начинает измерять, с какой силой F давит на землю тележка, движущаяся по ней горизонтально со скоростью V, и обнаруживает, что связь этих величин с хорошей точностью может быть описана формулой, которая очень похожа на релятивистские:

$$F = F_0 \cdot (1 - V^2/C^2), \qquad (3)$$

где F_0 – сила давления на землю неподвижной тележки. Но вот что его поражает более всего. Оказывается, что величина C^2 приблизительно равна $1/2 \cdot g \cdot D$ **,** т. е. справедлива формула

$$C^2 \approx 1/2 \cdot g \cdot D. \qquad (4)$$

Упорный Андриамбахуака в глубоком недоумении. Кто бы мог подумать?! Ну, формулы (1) и (2) сами по себе ничего особенного. Законы как законы. Один про расстояния видимости. Другой про скорость падения камня. Значит, уж так устроил божественный Занахари (он же Андриаманитра). Но вот формула (3) – ни в какие ворота!

Во-первых, получается, что с увеличением скорости движения тележка давит на поверхность все слабее, хотя причину, побуждающую тела падать с постоянным ускорением никто не отменял. Но теперь для ее компенсации требуется все меньшая сила! Во-вторых, при достижении скорости $V_{cosm} = C$ тележка вообще перестанет давить на землю. Правда, скорость огромная:

$$V_{cosm} \approx \sqrt[2]{1/2 \cdot 1{,}27 \cdot 10^7 \text{ м} \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2} \approx 7{,}9 \text{ км/с}.$$

Во-третьих, хуже всего другое. Что будет, если величина V_{cosm} превысит величину C?! И как вообще сюда затесались константы D и g из совсем других экспериментов? Да еще и помноженные друг на друга? Что бы это все значило?

Обсуждение и оценка интеллектуальной «дистанции»

Для нас, и даже для нынешнего школьника, это не вопрос. Во-первых, в отличие от Андриамбахуаки, в нашу картину мира привычно включено представление о том, что мы живем не на острове, окруженном водой, а на планете, которая по форме близка к шару. Поэтому школьник рисует картинку (рис. 1) и с помощью теоремы Пифагора, которую тоже знает, показывает, что расстояние (L) от берега до точки появления на горизонте макушки парусной мачты связано с ее высотой (h) формулой

$$L^2 + R^2 = (R + h)^2, \qquad (5)$$

где R – радиус Земли.

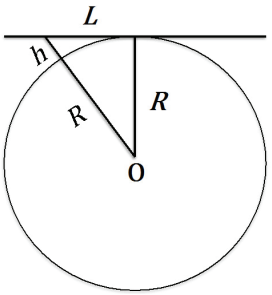


Рис. 1. Схема расчета расстояния до линии горизонта

Так как радиус Земли много больше высоты мачты, т. е. $R \gg h$, то связь между величинами L, h и R может быть представлена приближенно формулой, которая совпадает с формулой (1) Андриамбахуаки:

$$L = \sqrt[2]{2R \cdot h} = \sqrt[2]{D \cdot h}. \qquad (6)$$

Таким образом, так же как и мы со школьником, он смог бы объяснить свои наблюдения, если бы предположил, что живет не на плоском острове, окруженном водой, а на поверхности гигантского шара. Однако это противоречит повседневному опыту Андриамбахуаки и его соплеменников. Но если он все-таки сделает такое предположение, то не только объяснит эффект горизонта, но и поймет, что тележка, равномерно едущая по

поверхности Земли, испытывает ускорение, так как движется не по прямой линии, а по дуге, радиус которой равен радиусу Земли R. Направление этого ускорения a в любой точке Земли перпендикулярно ее поверхности, т. е. совпадает с направлением ускорения при свободном падении тел. При знании той же теоремы Пифагора величину этого ускорения $|a|$ он мог бы вычислить по формуле

$$|a| = V^2 / R = 2 \cdot V^2 / D. \quad (7)$$

Из нее следует, что при $V = V_{cosm}$ ускорение a_{cosm} совпадает с ускорением g и по величине, и по направлению:

$$|a_{cosm}| = 2 \cdot V_{cosm}^2 / D = 2 \cdot (1/2 \cdot g \cdot D) / D = g. \quad (8)$$

Получается, что тележка будет находиться в вечном падении. Шокирующий вывод! Но при понимании, что все происходит на шарообразной Земле, Андриамбахуака и его соплеменники поймут, как и мы со школьником сейчас, что это вечное падение является вечным вращением вокруг Земли, а $V = V_{cosm}$ – это первая космическая скорость.

Таким образом, две привычные нам фундаментальные идеи: жизни на поверхности гигантского шара и наличия постоянного фактора – гравитационной силы, с которой он притягивает к себе материальные тела, полностью объясняют экспериментальные результаты Андриамбахуаки. Вместе с тем кажется очевидным и то, что островному жителю нужно осуществить настоящий интеллектуальный прорыв, чтобы сложить из полученных им фактов единую картину. Тут-то и уместно вспомнить, что в науке в любой момент времени есть множество необъясненных фактов, в отношении которых мы находимся в положении не лучшем и не худшем, чем Андриамбахуака. Но мы ясно видим, что он не находится в тупике! Перенося это видение на себя, мы можем повысить свою мотивацию и тем самым ослабить когнитивную слепоту.

Ошибки управления физическим признаком объекта: технология сбора и анализа данных при помощи интерактивных систем опроса

В.А. Антонец[1,2], А.А. Харитонов[2]

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

В настоящее время общепризнано, что процесс принятия решений в условиях неопределенности может реализовываться по множеству сценариев. Известно также и то, что не все механизмы, которые представляют эти сценарии в качестве готовых форм, являются осмысленными.

В известной работе [1] авторы подробно изучают семейства таких сценариев, при следовании которым систематически принимаются неверные решения, и предпринимают попытку классификации на основании свойства «замещения атрибута» (*attribute substitution*) – основополагающего механизма их реализации; результатом подобной классификации становится формулирование необходимых условий для возможности замещения:

- изъятие целевого свойства не представляется возможным при воспроизведении данных из памяти или при ответе на вопрос о текущем состоянии;
- изъятие целевого свойства при автоматической оценке ситуации в нормальных условиях восприятия или в ситуации фиксирования установки (прайминг) (например, [2]);
- целевое свойство непосредственно не фиксируется; ошибки возникают при ответе на специально сконструированный вопрос, в основе ошибок лежат эвристические механизмы [3] оптимизации задачи «время ответа на вопрос – степень точности ответа».

Свойство замещения объясняет существование некоторых иллюзий восприятия, например различение размеров физически тождественных объектов на изображении с перспективой [4]; в этом смысле принимается решение о том, *тождественны* ли объекты.

Обсуждая причины зрительных иллюзий, следует указать, что иногда они появляются вследствие специально созданных условий наблюдения. Известны и иллюзии, обусловленные оптическим несовершенством глаза, некоторыми особыми свойствами различных анализаторов, участвующих в зрительном процессе. Однако подавляющее большинство иллюзий зрения возникает не из-за оптического несовершенства глаза, а вследствие ложного суждения о видимом, в процессе осмысливания зрительного образа. Такие иллюзии исчезают при изменении условий наблюдения, при выполнении простейших сравнительных измерений и обнаруживают тот факт, что разные субъекты в процесс зрительного восприятия обладают различными, персонифицированными особенностями при совершении ошибок. Традиционное различие проводится между двумя классами иллюзий [5].

Наиболее известные и исторически более надежные прецеденты сложились в области восприятия статических конфигураций (геометрические иллюзии, например иллюзия Мюллера – Лайера и др.). Несмотря на то что не существует единой теории, объясняющей все подобные случаи, в основном не вызывает споров, что эффекты иллюзий естественно возникают из взаимодействия специфической визуальной конфигурации с основными процессами зрения. Как писал Дж. Гибсон [6]: «*...as we should never have expected equal lengths to appear equal when they are incorporated in different figures*» (не следует ожидать, что равные длины будут казаться равными, будучи встроены в разные фигуры).

Второй класс включает в себя иллюзии, использующие движение или представление о нём. Некоторые из этих феноменов, такие как, например, «фи-движения», имеют в своей основе нейрофизиологические особенности зрительной системы [7]; напротив, другие, более сложные феномены предполагают вовлечение высших когнитивных функций [8].

С точки зрения методологии психофизических измерений свойство замещения атрибута может быть использовано для количественной оценки визуальных и иных иллюзий восприятия как для внутрисубъектных, так и для межсубъектных планов.

Возможность количественной оценки параметров перцептуального образа относительно физических параметров существует для широкого класса объектов. Вне зависимости от выбранной модальности целевое свойство при этом представляет собой физическую характеристику объекта (яркость, высота тона, геометрическая форма и пр.). Задача субъекта при этом состоит в том, чтобы в результате некоторого процесса управления привести заданную характеристику (одну или несколько) в полное соответствие с эталонной: добиться совпадения цветов, яркости, высоты колебаний и др. (в отличие от присвоения численной оценки на некоторой шкале [9]). Несоответствия параметров характеристик в результате неточности совпадений представляются в виде координат в обобщённом пространстве признаков, при этом различия относительно эталонных параметров с учётом метрики пространства интерпретируются как *ошибки управления*. При этом ошибки могут отражать как свойства анализатора, так и некоторое комплексное когнитивное свойство. Давно замечено, что когда субъект изменяет стимул, чтобы сравнить его (равенство) с эталонным стимулом по какому-либо критерию, он склонен ог-

раничивать диапазон своих регулировок. Больше века назад *Hollingworth* [10] заявил о тенденции для наблюдателя к регрессу к среднему значению и, следовательно, усреднении диапазона переменных управления: «*...Judgments of time, weight, force, brightness, extent of movement, length, area, size of angles, have all shown the same tendency to gravitate toward a mean magnitude...*» (суждения о времени, весе, силе, яркости, границах движения, длине, площади, величине углов демонстрируют общую тенденцию тяготеть к некоторому среднему). Схожие тенденции к регрессии обнаруживаются при сравнении разных экспериментов. Так, в [11] проиллюстрировано, как эффект регрессии проявляется при анализе результатов кроссмодального различения. В экспериментах по изучению трекинга с визуальной обратной связью [12, 13] наблюдаются различные типы искажений при динамическом воспроизведении геометрического образа. Сравнение результатов в различных экспериментальных условиях позволяет различать два вида искажений: *индивидуальные* (величина ошибки и её разброс могут меняться у каждого субъекта в отдельности, сам эффект остаётся значимым) и ошибки управления, связанные со специфическим законом движения / динамики. Второй тип искажений сложным образом связан с первым. Подтверждением этому служит серия самостоятельно проведённых исследований, связанных с инструментальным исследованием сенсорных функций по их моторным отображениям; так, при восстановлении человеком углов наклона отрезков прямой [14] и при управлении положением манипулятора в рамках hand-tracking [15] зарегистрированы индивидуальные сенсорные шкалы ориентационной настройки зрительной и слуховой систем.

Насколько формирование индивидуальной шкалы подчинено обращению к конкретному субъекту? Какие способы можно предложить для измерения величины ошибок и их классификации в процессе управления физическим признаком объекта? Как в таком случае следует понимать регрессию к среднему? Как формально описать свойство замещения? В качестве возможного ответа на все указанные вопросы можно предложить методологию *коллективного* управления, когда управление физическими признаками осуществляется участниками экспериментов параллельно и с разной степенью зависимости от результатов управления друг друга. Насколько *коллективное среднее* отличается от *индивидуального среднего*? Можно ли говорить об *эргодичности* системы коллективного управления?

Стоит отметить, что дизайн такой системы довольно сложен и требует основательного продумывания деталей. Компромисс между сложностью и эффективностью, однако, может быть достигнут при помощи интерактивных систем опроса, традиционно использующихся при проведении презентаций, проверке результатов успеваемости и голосовании. В отличие от стандартного протокола эксперимента по манипуляции виртуальными объектами, предусматривающего непосредственное контакт-управление манипулятором, т. е. *моторный контроль*, беспроводные системы опроса предусматривают бесконтактный многопользовательский интерфейс в виде пультовой системы и радиочастотного ресивера. Учитывая малое время при постановке задачи «вопрос-ответ», сбор данных может происходить быстро и захватывать большую аудиторию. Отличительными особенностями такого подхода являются формирование *семантической* (в отличие от сенсорной) шкалы оценки результата и простота статистической обработки данных. Участники эксперимента уравнены по своим физическим возможностям. Количество обнаруживает качество?

Возможность убедиться в этом будет представлена непосредственно во время доклада с демонстрацией и оценкой полученных результатов.

План предлагаемого исследования таков:

1. Участники эксперимента получают инструкцию по работе с системой опроса.

2. Участникам эксперимента последовательно предъявляются слайды презентации, каждый из которых содержит задачу по поиску тождественных объектов или оценке их различия (например, «укажите объекты / сочетания объектов одинаковой яркости / формы / размера», или «оцените степень различия характеристики объекта по шкале от 1 до 10»); подразумевается возможность использования как бинарной, так и номинальной, и порядковой шкал оценки.

3. По окончании презентации производится анализ результатов опроса при помощи построения статистического распределения пар «вопрос – верный / неверный ответ»; демонстрируется возможность проследить индивидуальную траекторию ответов участника и сравнить её показатели со средними показателями аудитории.

4. Краткое обсуждение результатов.

Литература

1. *Kahneman D., Frederisk Sh*. Representativeness Revisited, Attribute Substitution in Intuitive Judement // Heuristics and biases: The psychology of intuitive thought / Thomas Gilovich, Dale Griffin, and Daniel Kahneman (Ed.). N. Y. : Cambridge Univ. Press, 2002.

2. *Posner M.I., Snyder C.R.R.* Attention and cognitive control // *Solso R.L.* (*Ed.*). Information processing and cognition : The Loyola Symposium. Hillsdale ; Erlbaum, 1975. P. 55–85.

3. *Gigerenzer G., Gaissmaier W*. Heuristic Decision Making // Annual Review of Psychology. 2011. V. 62. P. 451–482.

4. *Kahneman D.* Maps of Bounded Rationality: Psychology for Behavioral Economics // American Economic Review / American Economic Association. 2003. V. 93 (5). P. 1449–1475.

5. *Coren S., Girgus J.S.* Seeing is deceiving: The psychology of visual illusions. Hillsdale : Erlbaum, 1978.

6. *Gibson J.J.* The senses considered as perceptual systems. Boston : Houghton-Mifflin, 1966.

7. *Grusser O.-J., Grusser-Cornhels U.* Neuronal mechanisms of visual movement perception and some psychophysical and behavioral correlations // Jung R. (ed.) Handbook of sensory physiology : Vol. 7lla : Central processing of information. P. 333–426. N. Y. : Springer-Verlag, 1973.

8. *Johansson G.* Visual event perception // *Held R., Leibowitz H.W., Teuber H.-L.* (*eds.*) Handbook of sensory physiology, 1978.

9. *Alexander K.R., Shansky M.S.* Influence of hue, value, and chroma on the perceived heaviness of colors // Perception & Psychophysics. 1976. V. 19 (1). P. 72–74.

10. *Hollingworth H.L.* The central tendency of judgment // J. Phil. Psychol. 1910. V. 7. P. 461–469.

11. *Stevens J.C., Marks L.E.* Cross-modality matching of brightness and loudness // Proc. Nat. Acad. Sci. 1965. V. 54. P. 407–411.

12. *Viviani P., Campadelu P., Mounoud P.* Visuo-manual tracking of human bidimensional movements // J. Experjmental Psychology: Human Perception de Performance. 1987. V. 13. P. 62–78.

13. *Viviani P., Terzuolo C.* Trajectory determines movement dynamics // Neuroscience. 1982. V. 7. P. 431–437.

14. *Нуйдель И.В., Полевая С.А., Казаков В.В., Еремин Е.В., Антонец В.А., Яхно В.Г.* Исследование ориентационной чувствительности зрительной системы человека // VII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2005» : сборник научных трудов. Ч. 2. М. : МИФИ, 2005. С. 93–99.

15. *Антонец В.А., Полевая С.А., Казаков В.В.* Hand-tracking: исследование первичных когнитивных функций человека по их моторным проявлениям // Современная экспериментальная психология : в 2 т. / под ред. В.А. Барабанщикова. М. : Институт психологии РАН, 2011. Т. 2. Гл. 33. С. 39–53.

Возбуждение циклической активности в модельных нейронных сетях

М.В. Бажанова[1], А.Ю. Симонов[1], С.А. Лобов[1], К.И. Балашова[1],
В.А. Макаров[1,2], В.Б. Казанцев[1]

[1] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
bazhanova.mila@gmail.com, lobov@neuro.nnov.ru
[2] Universidad Complutence de Madrid, Испания
vmakarov@ucm.es

В последние годы можно наблюдать растущий интерес к исследованиям процессов генерации популяционной динамики в нейронных сетях, а также формированию топологии связей. Локальная электрическая стимуляция сети может обеспечивать формирование различных путей распространения возбуждения между нейронами, что приводит к адаптивным изменениям в активности нейронов.

Для изучения динамики сетей и выявления основополагающих биофизических механизмов удобно использовать математические модели нейронных культур [1, 2]. Одной из основных характеристик данных моделей является синаптическая пластичность, отвечающая за изменчивость и адаптацию сетей к различным стимулам [3]. Ранее было показано, что модельные сети могут демонстрировать берстовую активность, часто наблюдаемую в экспериментах с живыми культурами [4, 5].

Кроме моделирования биологических объектов, нейронные сети также могут быть использованы для построения систем контроля и управления [6]. В частности, существуют примеры успешного применения нейронных сетей в задачах управления роботами и роботизированными устройствами [7–9]. В то же время проблема, связанная с контролем активности сетей, вызванной электрической стимуляцией одним или несколькими электродами, остается в значительной мере нерешенной. В данной работе мы исследуем возможность создания устойчивых колебательных паттернов циклической активности в сетях, вызванных внешней стимуляцией.

Для описания динамики единичного нейрона была использована модель Ижикевича [10]:

$$v' = 0,04v^2 + 5v + 140 - u + I(t), \qquad (1)$$

$$u' = a(bv - u), \qquad (2)$$

где v описывает мембранный потенциал, u является вспомогательной переменной, a, b, c, d – параметры, I представляет собой ток, поступающий на нейрон. После спайка происходит сброс значений переменных следующим образом:

$$\text{если} \quad v \geq 30 \text{ мВ, то} \begin{cases} v \to c, \\ u \to u + d. \end{cases} \qquad (3)$$

Внешний синаптический ток задается следующим образом:

$$I(t) = \sum w_i g_i y_i (t - \delta_i) + I_{ex}(t), \qquad (4)$$

где w_i – вес синапса, y_i – выходной сигнал с i-го нейрона, рассчитанный в соответствии с моделью синапса Цодыкса – Маркрама [11], g_i – коэффициент, принимающий положительное значения для возбуждающих нейронов и отрицательное, если нейрон тормозной, I_{ex} – внешний ток, который является суммой шумового тока и тока, поступающего от стимулирующего электрода. Для описания изменения весов связей была использована STDP-пластичность.

Чтобы проверить, каким образом может сохраняться память о сигнале, который повторяется с некоторой периодичностью, к нейронной сети был подключен единичный электрод, с которого поступал периодический сигнал. В результате действия STDP-пластичности при подаче периодического сигнала с периодом T возможна ситуация образования замкнутой петли распространения возбуждения (рис. 1).

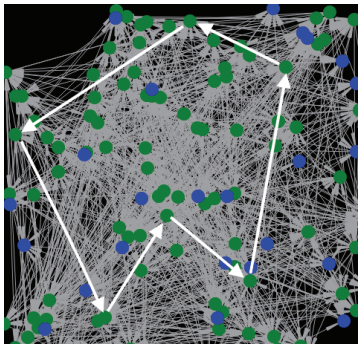


Рис. 1. Петля, сформировавшаяся в нейронной сети под действием стимуляции одного электрода

Время прохождения сигнала по петле совпадает с периодом внешней стимуляции, $t_s = T$. При образовании достаточно сильной связи, замыкающей эту петлю, даже единичное воздействие приведет к периодической циркуляции сигнала (рис. 2).

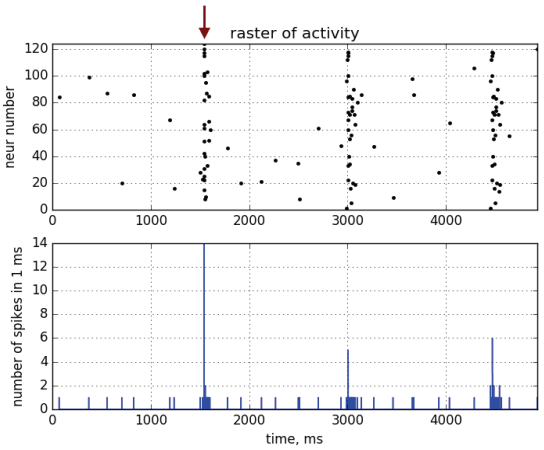


Рис. 2. Растр активности сети под действием единичного импульса при сохранении памяти о периодическом сигнале

При стимуляции сети единичным электродом нам не удалось достичь образования петель с большим периодом. Из этого можно сделать вывод, что в этом случае уже имеющаяся нейронная цепочка небольшой длины, идущая от стимулируемого нейрона, замыкается в петлю с периодом T.

С целью создания более длинных кольцевых путей были предприняты попытки подключения к сети четырех электродов. Численные эксперименты с использованием четырехэлектродной стимуляции для однородной структуры сети показали неудачные результаты (рис. 3).

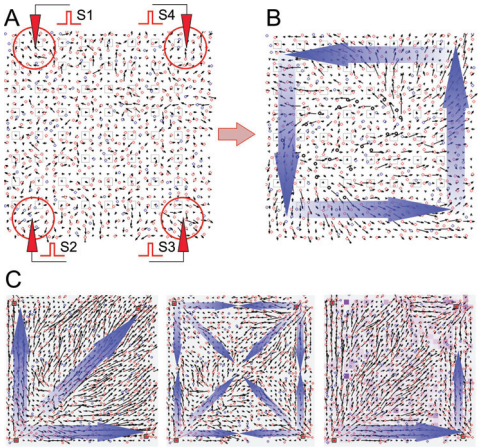


Рис. 3. Неудачный результат формирования циркулярной спайковой активности в неструктурированной нейронной сети под действием стимуляции четырех электродов: A – протокол стимуляции; B – ожидаемое направление связей; C – примеры направлений связей, полученных в результате стимуляции

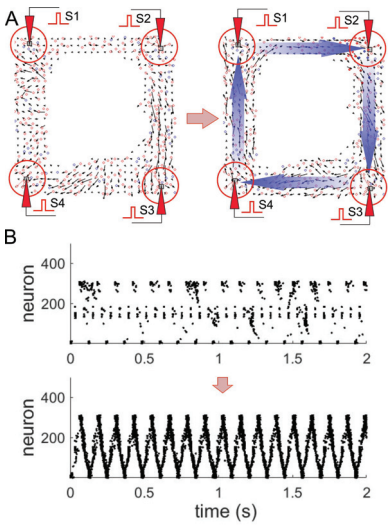


Рис. 4. Циркулярная активность в частично структурированной сети, вызванная стимуляцией четырех электродов: A – протокол стимуляции; B – растр активности сети в начальный момент (*сверху*) и после некоторого времени стимуляции

Высказывалось предположение, что этот эффект связан с наличием альтернативных путей, препятствующих обучению. Действительно, если изменить топологию сети так, как показано на рис. 4, A, точно такая же стимуляция приведет к возникновению циркулярной спайковой активности. Данное явление можно рассматривать как простую модель пространственной памяти.

Работа поддержана грантом РНФ № 15-12-10018.

Литература

1. *Segev R., Shapira Y., Benveniste M., Ben-Jacob E.* Observations and modeling of synchronized bursting in twodimensional neural networks // Phys. Rev. E. 2001. V. 64(01). P. 011920.

2. *Chao Z.C., Bakkum D.J., Potter S.M.* Region-specific network plasticity in simulated and living cortical networks: comparison of the center of activity trajectory (CAT) with other statistics // J. Neur. Eng. 2007. V. 4. P. 294–308.

3. *Gritsun T., le Feber J., Rutten W.L.C.* Growth dynamics explain the development of spatiotemporal burst activity of young cultured neuronal networks in detail // PLoS ONE. 2012. V. 7(9). P. e43352.

4. *Khazipov R., Sirota A., Leinekugel X.* Early motor activity drives spindle bursts in the developing somatosensory cortex // Nature. 2004. V. 432. P. 9–12.

5. *Cohen D., Segal M.* Network bursts in hippocampal microcultures are terminated by exhaustion of vesicle pools // J. Neurophysiol. 2011. V. 106. P. 2314–2321.

6. *Tamer A., Zohairy Al, Khaled S.* Adaptive control for MIMO nonlinear systems based on PID neural networks // Int. J. Eng. Comput. Sci. 2016. V. 5, iss. 8. P. 17673–17678.

7. *Lobov S.A., Mironov V.I., Kastalskiy I.A., Kazantsev V.B.* A spiking neural network in sEMG feature extraction // Sensors. 2015. V. 15(11). P. 27894–27904.

8. *Lobov S., Kazantsev V., Makarov V.A.* Spiking Neurons as Universal Building Blocks for Hybrid Systems // Adv. Sci. Lett. 2016. V. 22. P. 2633–2637.

9. *Villacorta-Atienza J.A., Calvo C., Lobov S.A., Makarov V.A.* Limb Movement in Dynamic Situations Based on Generalized Cognitive Maps // Math. Model. Nat. Phenom. 2017. V. 12(4). P. 15–29.

10. *Izhikevich E.M.* // IEEE Trans. Neural Netw. 2003. V. 14, № 6. P. 1569.

11. *Tsodyks M., Pawelzik K., Markram H.* Neural network with dynamic synapses // Neural Comput. 1998. P. 821–835.

Принципы организации движений и гипотеза Н.А. Бернштейна «о повторении без повторений»

А.Е. Баженова, И.В. Илюйкина, М.В. Трусов, Б.Р. Гимадиев

Сургутский государственный университет

Введение

В 1947 г. Н.А. Бернштейн выступил с гипотезой о «повторении без повторений» в организации любого произвольного движения человека. За почти 70 лет с момента выхода его монографии [11] мы практически не имеем точных аналитических моделей, описывающих динамику поведения тремора (и треморограмм – ТМГ), который ряд ученых считает непроизвольными движениями. Н.А. Бернштейн призывал к разработке системно-структурного подхода в изучении строения и функций различных систем движений.

Актуальность изучения одной из фундаментальных проблем управления движением, а именно управление отдельными частями тела человека со стороны мозга, с точки зрения биомеханических и функциональных характеристик очевидна. Тогда возникает проблема количественного описания эффекта Еськова – Зинченко, в котором наблюдается статистическая неустойчивость параметров движения и который впервые дал количественные подтверждения гипотезы Н.А. Бернштейна [9, 10, 15].

Функциональное состояние организма человека в условиях выполнения специфических двигательных задач представляет особый интерес именно в рамках теории хаоса и самоорганизации (ТХС), так как стохастический подход дает низкую эффективность в количественном описании любого движения [2, 6]. В наших исследованиях выполнялся анализ параметров нервно-мышечной системы (НМС) человека, который характеризует именно изменения хаотических параметров НМС у женщин при выполнении регулярных физических упражнений. Более того, при целенаправленном управлении физической активностью (в виде спорта) физическая подготовка большинства жителей Севера РФ может обеспечить пролонгацию их жизни [1, 3]. Объективная оценка состояний НМС при систематических физических нагрузках требует новых методов обработки данных и расширения диагностических признаков, что становится возможным сейчас с позиции новой ТХС в отношении не только НМС, но и других гомеостатичных систем [7, 12–14].

Целью данного исследования является оценка особенностей хаотической динамики тремора микродвижений верхних конечностей женщин с различной физической подготовленностью без нагрузки и в условиях воздействия статических нагрузок с позиции ТХС и эффекта Еськова – Зинченко.

Методы исследования

В данном сообщении предлагается внедрение традиционных и новых физических методов в биологические исследования на основе метода многомерных фазовых пространств для изучения особенностей реакции НМС в ответ на дозированные статические нагрузки. При этом вместо традиционного понимания стационарных режимов биосистем в виде $dx/dt = 0$, где $x = x(t) = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^{\tau}$ является вектором состояния системы, или при расчете статистических функций распределения $f(x)$, когда стационарный режим требует неизменности этих $f(x)$ для полученных подряд выборок параметра x, мы используем матрицы парных сравнений выборок [5]. Эти движения имеют хаотический характер, т. е. постоянно $dx/dt \neq 0$, а получить для двух соседних выборок $f_j(x_i(t)) = f_{j+1}(x_i(t))$ почти невозможно. В этой связи предложены и новые методы расчета хаотической динамики тремора (как якобы непроизвольного движения).

В исследовании приняли участие женщины, проживающие на территории округа Югры не менее 5 лет (средний возраст обследуемых – 31 год). В зависимости от степени физической активности было сформировано 2 группы по 15 человек: 1 – не спортсмены (женщины, занимающиеся физическими упражнениями нерегулярно, менее 3 раз в неделю); 2 – спортсмены (женщины, профессионально занимающиеся спортом, имеющие спортивную квалификацию не ниже 1-го взрослого разряда и продолжающие заниматься систематически физическими упражнениями более 3 раз в неделю).

У испытуемых регистрировались параметры тремора с помощью биофизического измерительного комплекса, разработанного в лаборатории биокибернетики и биофизики сложных систем при СурГУ [4, 8]. Установка включает металлическую пластинку, которая крепится жестко к пальцу испытуемого, токовихревой датчик, усилитель вместе с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и компьютер с оригинальным программным обеспечением. В качестве фазовых координат, помимо координаты $x_1 = x_i(t)$ перемещения конечности, использовалась координата скорости перемещения пальца $x_2 = dx_1/dt$. Перед испытуемыми стояла задача удержать палец в пределах заданной области, осознанно контролируя его неподвижность в заданной точке пространства. Каждый испытуемый проходил $N = 15$ серий эксперимента, в каждой из которых регистрация тремора проводилась $n = 15$ в спокойном состоянии и аналогично ($N = 15$, $n = 15$) при нагрузке $F = 3$ Н (груз, прикрепляемый к указательному пальцу).

Статистическая обработка данных осуществлялась при помощи программного пакета «Statistica 10». Анализ соответствия вида распределения полученных данных закону нормального

распределения производился на основе вычисления критерия Шапиро – Уилка. При использовании непараметрического парного сравнения ТМГ с помощью критерия Вилкоксона были построены 15 таблиц для каждого испытуемого в спокойном состоянии и 15 в условиях воздействия статической нагрузки F = 3 Н (всего 225 выборок ТМГ).

Регистрируемые с помощью АЦП ТМГ квантовались с периодом квантования всех ТМГ t = 0,01 с и регистрировались в виде файла (общее время регистрации i-й выборки T = 5 с, количество точек в раскрытом файле z = 500). Затем было произведено попарное сравнение отрезков ТМГ для каждой выборки ТМГ испытуемого на предмет принадлежности всех этих выборок к общей генеральной совокупности (одного и того же испытуемого, находящегося в определенном гомеостазе).

Результаты исследования и их обсуждение

Особая хаотическая динамика непроизвольных микродвижений конечностей (тремора пальцев рук) как реакция на статическую нагрузку проявлялась в изменении числа совпадений произвольных пар выборок (k), которые (пары) можно отнести к одной генеральной совокупности. Для этого рассчитывались матрицы парных сравнений. Отметим, что в эффекте Еськова – Зинченко базовый постулат декларирует отсутствие статистической устойчивости (нет совпадений подряд полученных выборок x_i) для любых параметров гомеостатичной биосистемы.

Конкретные (для N = 1) примеры результатов расчета матриц (15×15) парного сравнения ТМГ (координата $x_i(t)$) испытуемых с различной физической подготовкой показали, что число пар одинаковых выборок невелико (k_{11} = 3, k_{12} = 6, k_{21} = 2 и k_{22} = 4), но они значительно отличаются как для спортсмена, так и для человека без физической подготовки. В качестве примера в табл. 1 представлена характерная матрица для испытуемого-неспортсмена (всего по этой методике получено от каждого испытуемого 225 выборок ТМГ и было построено 15 таких матриц), находящегося без нагрузки (в свободном состоянии).

Таблица 1

Матрица парного сравнения ТМГ неспортсмена (без нагрузки; число повторов n = 15; использовался критерий Вилкоксона (значимость p < 0,05, число совпадений k_{11} = 3))

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	**,63**	,00	,00	,00	,00	,00	,00
2	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
3	,00	,00		**,69**	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
4	,00	,00	**,69**		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
5	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
6	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
7	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
8	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
9	**,63**	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00
10	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00
11	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	**,70**
12	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00
13	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00
14	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00
15	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	**,70**	,00	,00	,00	

Одновременно для каждого такого спокойного состояния эксперимент повторялся, но уже с нагрузкой F = 3 Н, регистрировались 225 ТМГ этого же испытуемого (см. табл. 2).

Таблица 2

Матрица парного сравнения ТМГ неспортсмена (F = 3 Н; число повторов n = 15; использовался критерий Вилкоксона (значимость p < 0,05, число совпадений k_{12} = 6))

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	**,47**	,00	**,24**
2	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
3	,00	,00		**,33**	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
4	,00	,00	**,33**		,00	**,71**	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
5	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	**,65**	,00	,00	,00
6	,00	,00	,00	**,71**	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
7	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	**,52**	,00	,00	,00
8	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
9	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00
10	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00
11	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00
12	,00	,00	,00	,00	**,65**	,00	**,52**	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00
13	**,47**	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,02
14	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00
15	**,24**	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,02	,00	

Итог сравнения 15 серий выборок ТМГ у двух разных групп испытуемых в спокойном состоянии и 15 серий с грузом F = 3 Н показывает, что отсутствует статистическая устойчивость выборок ТМГ как для спортсмена, так и для неспортсмена. Повторение происходит без статистического «повторения», выборки почти все разные для ТМГ, а получить подряд две одинаковые выборки (произвольно!) вообще невозможно. Мы имеем хаотический калейдоскоп статистических функций распределения $f(x)$ для ТМГ. В качестве примера представлены результаты испытуемого А (неспортсмена) и Б (спортсмена) – табл. 3.

Таблица 3

Число совпадений (k_1 и k_2) матриц парного сравнения ТМГ испытуемых А и Б в 15 сериях экспериментов (использовался критерий Вилкоксона, p < 0,05)

№ п/п	Испытуемый А (неспортсмен)		Испытуемый Б (спортсмен)	
	Без нагрузки	В условиях нагрузки F = 3 Н	Без нагрузки	В условиях нагрузки F = 3 Н
1	2	5	4	2
2	2	8	4	3
3	1	8	2	4
4	2	6	2	2
5	1	7	3	1
6	4	6	1	5
7	4	4	6	4
8	4	4	2	3
9	3	2	1	6
10	9	5	1	3
11	3	10	1	4
12	1	5	0	2
1	2	5	0	1
14	5	4	3	6
15	1	6	2	1
<*k*>	**2,93**	**5,67**	**2,13**	**3,13**
σ,±	**2,13**	**1,99**	**1,64**	**1,68**

Среднее значение числа совпадений произвольных пар выборок ТМГ испытуемого-

неспортсмена $<k_{11}>$ = 2,93, что существенно меньше, чем при нагрузке – $<k_{12}>$ = 5,67. Всегда люди без физической подготовки демонстрируют подобные различия между состоянием реальным и состоянием с нагрузкой. Иная ситуация наблюдалась для испытуемого Б, где $<k_{21}>$ = 2,13 меньше, чем $<k_{22}>$ = 3,13, но эти различия меньше (по величине), чем различия для испытуемого А. Такая закономерность наблюдалась у всех испытуемых в режиме 225 повторов измерения ТМГ с грузом (F = 3 Н) и без груза, однако величины k_1 и k_2 имели индивидуальный характер (у некоторых испытуемых $<k_1>$ = 4, а $<k_2>$ = 7,4 и т. д.).

Это доказывает существенные индивидуальные различия в параметрах тремора и ставит под сомнение целесообразность объединения разных людей в статистические группы вообще. Мы сейчас переходим на индивидуальную медицину, где каждый человек имеет свой фазовый портрет в ограниченном (по размерам) фазовом пространстве состояний всего вектора гомеостаза $x = x(t) = (x_1, x_2, \ldots, x_m)^{\tau}$, где m может быть очень большим: $m > 10$ или $m > 100$ и т. д. Для тремора такими фазовыми координатами являются: $x_1(t)$ – координата, $x_2(t) = dx_1/dt$ – скорость, $x_3(t) = dx_2/dt$ – ускорение движения конечности в пространстве.

Также было выявлено, что среднее число совпадений $<k>$ у неспортсмена и спортсмена в спокойных условиях несколько различается (см. табл. 3), что является маркером тренированности женского населения Югры (или детренированности). Число совпадений $<k_{11}>$ (неспортсмена) изначально больше, чем $<k_{21}>$ (спортсмена): $k_{11} = 2{,}93 > k_{21} = 2{,}13$. Соответствующим образом увеличивается среднее число совпадений $<k>$ в условиях с воздействием статической нагрузки F = 3 Н: $k_{12} = 5{,}67 > k_{22} = 3{,}13$. Таким образом, число совпадений произвольных пар выборок (k) женщин-спортсменок остается меньше, чем у женщин с низкой физической активностью, на всех этапах эксперимента. Данная закономерность наблюдалась у всех испытуемых (15 неспортсменов, 15 спортсменов).

Заключение

В целом многократные повторения регистрации выборок ТМГ всегда демонстрируют отсутствие статистической устойчивости выборок. Это проявляется в том, что практически невозможно получить две подряд регистрируемые ТМГ, у которых мы бы наблюдали совпадения $f(x)$, т. е., как правило, $f_j(x_i) \neq f_{j+1}(x_i)$ для любого номера выборки j. Для тремора любого человека (и тренированного, и нетренированного) вероятность совпадения этих функций (т. е. чтобы $f_j(x_i) = f_{j+1}(x_i)$) не превышает $p \leq 0{,}001$. Это крайне малая величина, и она доказывает реалистичность эффекта Еськова – Зинченко и ограничивает возможности статистического описания движений. Необходим другой математический аппарат и другие методы описания неизменности движений (или их изменений), так как статистические функции $f_j(x_i)$ всегда не будут совпадать (при произвольной выборке x).

Литература

1. *Башкатова Ю.В., Карпин В.А., Попов Ю.М., Рассадина Ю.В., Шиляева О.С.* Оценка состояния параметров нервно-мышечного кластера в условиях дозированной физической нагрузки // Вестник новых медицинских технологий [Электронное издание]. 2014. № 1. С. 32.
2. *Белощенко Д.В., Майстренко Е.В., Королев Ю.Ю., Щипицин К.П.* Стохастическая оценка параметров нервно-мышечной системы человека при локальном холодовом воздействии // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 3. С. 37–42.
3. *Белощенко Д.В., Башкатова Ю.В., Щипицин К.П., Самсонов И.Н.* Неопределенность параметров нервно-мышечной системы у женщин // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 4. С. 24–30.
4. *Берестин Д.К., Горбунов Д.В., Поскина Т.Ю., Сидоренко Д.А.* Энтропийный подход в оценке параметров тремора при различных акустических воздействиях // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2015. № 3. С. 20–26.
5. *Берестин Д.К., Черников Н.А., Поскина Т.Ю., Потетюрина Е.С.* Хаотическая динамика амплитудно-частотных характеристик треморограмм при многократных повторах измерений // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 1. С. 71–78.
6. *Вохмина Ю.В., Бурыкин Ю.Г., Филатова Д.Ю., Шумилов С.П.* Стохастические и хаотические оценки непроизвольных движений человека // Вестник новых медицинских технологий. 2014. Т. 21, № 2. С. 10–15.
7. *Еськов В.В., Филатов М.А., Филатова Д.Ю., Прасолова А.А.* Границы детерминизма и стохастики в изучении биосистем – complexity // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 1. С. 83–91.
8. *Живогляд Р.Н., Живаева Н.В., Еськов В.В., Насирова А.Р., Чантурия С.М.* Методы многомерных фазовых пространств в диагностике эффективности гирудотерапии // Вестник новых медицинских технологий. 2012. Т. 19, № 2. С. 419–420.
9. *Зилов В.Г., Еськов В.М., Хадарцев А.А.. Еськов В.В.* Экспериментальное подтверждение эффекта «Повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2017. № 1. С. 4–9.
10. *Зинченко Ю.П., Филатова О.Е., Еськов В.В., Стрельцова Т.В.* Объективная оценка сознательного и бессознательного в организации движений // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, № 3. С. 31–39.
11. *Bernstein N.A.* The co-ordination and regulation of movements. Oxford : Pergamon Press, 1967.
12. *Betelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A., Gavrilenko T.V.* Stochastic volatility in the dynamics of complex homeostatic systems // Doklady Mathematics. 2017. V. 95, № 2. P. 642–644.
13. *Eskov V.M., Filatova O.E., Provorova O.V., Khimikova O.I.* Neural emulators in identification of order parameters in human ecology // Human Ecology. 2015. V. 5. P. 57–64.
14. *Eskov V.M., Eskov V.V., Vochmina J.V., Gavrilenko T.V.* The evolution of the chaotic dynamics of collective modes as a method for the behavioral description of living systems // Moscow University Physics Bulletin. 2016. V. 71, № 2. P. 143–154.
15. *Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Vochmina Yu.V.* Formalization of the Effect of “Repetition without Repetition” discovered by N.A. Bernshtein // Biophysics. 2017. V. 62, № 1. P. 143–150.

Динамика нерегулярности сердечного ритма при решении задач на родном (русский) и иностранном (немецкий) языках

А.В. Бахчина[1,2], И.С. Парина[2,3]

[1] Институт психологии РАН, Москва
nastya18-90@mail.ru
[2] Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова
parinai@yandex.ru
[3] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Исследование направлено на выявление характеристик режимов вегетативного обеспечения поведения в процессе научения на примере обучения иностранному языку. Для этого проведено сопоставление динамики вариабельности сердечного ритма (ВСР) при реализации языкового индивидуального опыта разного возраста.

С позиций системной психофизиологии реализация конкретного поведенческого акта обеспечивается активностью набора функциональных систем в их взаимодействии. В соответствии с концепцией системогенеза [4] функциональная система (ФС), как элемент структуры индивидуального опыта, фиксирована в специализации группы нейронов. Фиксация новой ФС в процессе научения не вытесняет ФС из уже имеющегося набора, а модифицирует их. Развитие индивида проявляется в структуре индивидуального опыта как формирование новых ФС, реализующих достижение более дифференцированных (детализированных) результатов, чем ранее сформированные ФС [2]. В рамках описанного подхода мы предполагаем, что сердце, включаясь в поведенческие акты, направленные на достижение разных результатов, вступает в отношения с разными наборами ФС. Поэтому активность сердца согласуется с разными наборами центральных нейронов и разной активностью периферических нейронов и зависит от цели поведения. Тогда ВСР является результатом процесса согласования элементов индивидуального опыта разного возраста и зависит от характеристик системной организации реализуемого поведения, от степени дифференцированности актуализированного в поведении набора систем.

Исходя из вышесказанного реализация поведения на иностранном языке (приобретенном позднее в онтогенезе по сравнению с родным языком) актуализирует более дифференцированные наборы систем. Поэтому можно предположить, что динамика сердечного ритма будет менее регулярной (более нестационарной) при реализации поведения на иностранном языке, чем на родном. Эта гипотеза проверялась в исследовании.

Материалы и методы

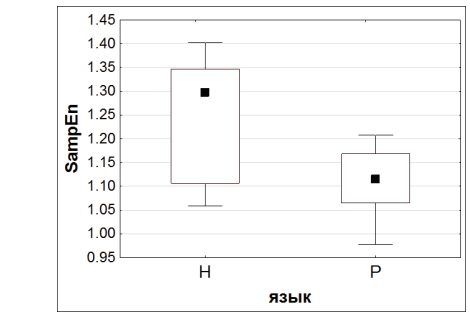
В исследовании приняли участие 17 студентов НГЛУ им. Н.А. Добролюбова (15 – ж, возраст 19–21, медиана 20), которые имели опыт изучения немецкого языка от 1 до 15 лет (медиана 4).

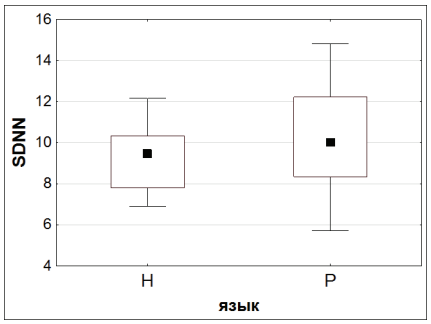
В эксперименте испытуемым давалось задание прочитать предложение и вставить пропущенное в нем слово. Предъявляемые в задании предложения были разделены на две группы – на русском и немецком языках. Каждая группа включала 25 предложений. Пропущенное слово всегда было существительным в функции дополнения. Порядок предъявления групп предложений был контрбалансирован в выборке. Предложения в каждой группе предъявлялись в случайном порядке.

При выполнении заданий у участников проводили беспроводную регистрацию сердечного ритма с использованием датчика Zephyr (HxM BT) и программы «HR-reader» [3]. Анализ динамики сердечного ритма за периоды выполнения заданий на русском и немецком языках включал вычисление: средней длительности RR-интервалов (HR (мс)), величины стандартного отклонения RR-интервалов (SDNN (мс)), величины выборочной энтропии (SampEn), которая выражает сложность (нерегулярность) последовательности RR-интервалов [1]. SampEn была выбрана для оценки сложности последовательностей RR-интервалов, так как она выражает степень сложности сигнала, то есть, чем выше регулярность сигнала, тем ниже величина SampEn (ниже сложность), и наоборот; алгоритм вычисления SampEn нечувствителен к кратковременным, локальным шумам в сигнале; SampEn позволяет получать надежные оценки, используя короткие последовательности данных; SampEn не коррелирует с выраженностью дыхательной аритмии в сердечном ритме, со стандартным отклонением и спектральными показателями анализируемой последовательности, то есть является относительно независимым показателем; SampEn не зависит от длины анализируемой последовательности, поэтому может быть использована для сравнения последовательностей разной длины. SampEn вычислялась со значениями входных параметров m = 2 (размерность вложения), r = 0,2SDNN («фильтрующий фактор»).

Результаты и обсуждение

Значения показателей ВСР за периоды решения заданий на русском и немецком языках сравнивались критерием Уилкоксона. В результате получено, что значения SampEn были достоверно выше при решении заданий на немецком языке, чем на русском (T = 8,00; Z = 3,24; p = 0,001). Значения SDNN (T = 52,00; Z = 1,16; p = 0,25) и HR (T = 53,00; Z = 1,11; p = 0,27) достоверно не отличались. Подробнее распределения переменных представлены на рис. 1.





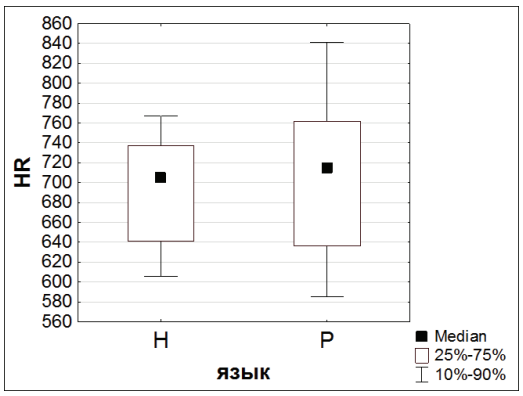


Рис. 1. Медианы, квартили, 10-й и 90-й процентили параметров ВСР при выполнении заданий на русском (Р) и немецком (Н) языках

Таким образом, актуализация языкового опыта, приобретенного относительно позднее в индивидуальном развитии (немецкий язык по сравнению с русским), сопровождалась увеличением сложности динамики сердечного ритма без изменений его среднего значения и общей дисперсии. Последнее принципиально важно, так как это означает, что выполнение задач на иностранном языке в данном случае не сопровождалось большим напряжением или ресурсообеспечением организма по сравнению с выполнением задач на родном языке. Выявленная большая сложность последовательностей межударных интервалов в сердечном ритме при решении задач на иностранном языке позволяет предполагать, что реализация в поведении индивидуального опыта разной дифференцированности отражается не только в характеристиках активности мозга, но и других частей организма.

Выполнено при поддержке гранта РФФИ (проект № 16-36-00101).

Литература

1. *Richman J.S., Lake D.E., Moorman J.R.* Sample Entropy // Methods in Enzymology. 2004. V. 384. P. 172–184.

2. *Александров Ю.И.* Развитие как дифференциация // Теория развития: Дифференционно-интеграционная парадигма / сост. Н.И. Чуприкова. М. : Языки славянских культур, 2009. С. 17–28.

3. *Полевая С.А., Рунова Е.В., Некрасова М.М., Федотова И.В., Ковальчук А.В., Бахчина А.В., Шишалов И.С., Парин С.Б.* Телеметрические и информационные технологии в диагностике функционального состояния спортсменов // Современные технологии в медицине. 2012. № 4. С. 94–98.

4. *Швырков В.Б.* Введение в объективную психологию. Нейрональные основы психики. М. : ИП РАН, 1995. 162 с.

Модель нейрона со структурной адаптацией и ее программная реализация в нейроморфных системах

А.В. Бахшиев[1], Л.А. Станкевич[2], Ф.В. Гунделах[2], В.В. Михайлов[1]

[1] Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург
[2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Введение

В настоящее время существует множество слабоформализуемых задач, плохо решаемых существующими методами, например:

- управление неустойчивыми системами;
- управление поведением мобильных роботов в изменчивой среде.

Одним из перспективных общих подходов в решении такого рода задач являются искусственные нейронные сети (ИНС).

Однако существующие и часто применяемые на практике модели ИНС, включая сети глубокого обучения [1], используются для решения частных задач. Они решают их часто лучше, чем другие подходы, но остается проблема обобщения таких решений. В частности, в случае смены задачи необходимо строить новую сеть, формировать новые выборки и проводить снова обучение сети. Это связано с тем, что в традиционных ИНС:

- отсутствуют структурные адаптивные возможности;
- имеется выделенный (и длительный) этап обучения.

Указанные недостатки частично устранены в рамках моделей растущих нейронных сетей [2–4], алгоритмов онлайн-обучения [5] и др. Однако предлагаемые модели и алгоритмы зачастую входят в противоречие друг с другом, и пока, на наш взгляд, еще не разработаны модели, объединяющие преимущества отдельных решений.

В связи со сказанным представляется перспективным применение нейроморфного подхода, в рамках которого системы обработки информации формируются, основываясь на моделях нейронов и ИНС, архитектура и дизайн которых базируются на принципах работы и структурах биологических нейронов и нейронных сетей (НС) мозга, который очень пластичен и легко адаптируется к новым условиям.

Анализ проблемы

Существует ряд проектов, которые в той или иной степени базируются на нейроморфном подходе:

- крупномасштабное моделирование мозга – Blue Brain Project, Human Brain Project [6, 7];
- обратное конструирование мозга – Rebrain [8];
- когнитивная робототехника – DARWIN и NOMAD [9];
- система Albus [10];
- «Мозг анимата» [11];
- «Автономный искусственный интеллект» [12].

Особенность проектов крупномасштабного моделирования мозга в том, что они идут сверху, т. е. моделируются высшие нервные структуры, коры мозга, функции мозжечка. На основе этого делается попытка понять, как осуществляется высшая когнитивная деятельность и, в первую очередь, как построить системы, которые будут функционировать и учиться аналогично биологическим.

Однако можно предложить другой подход – идти снизу, от движений, поскольку биологические НС появились как ответ на потребность организмов, в первую очередь, в движении. Заметим, что движение в широком смысле включает восприятие и активную реакцию на среду и является основной функцией всех организмов, над которой весь остальной поведенческий функционал надстраивается. Поэтому можно пойти по пути создания систем, сначала управляющих простыми движениями, а потом все более их усложняя, например до возможности управления поведением робота в определенной среде. При этом не обязательно должен быть физический робот, который функционирует в среде. Принципиальным моментом здесь является то, что система взаимодействует со средой и ИНС осуществляет весь цикл обработки информации, от получения ее с сенсоров до влияния на среду через какие-либо эффекторы.

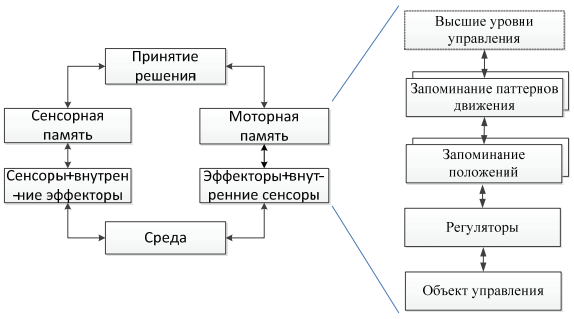


Рис. 1. Структура нейроморфной системы управления поведением

На рис. 1 представлена структура нейроморфной системы, которая условно разбита на две части: сенсорную, где осуществляется запоминание и обобщение информации об объектах интереса; и моторную, в которой запоминаются доступные паттерны движения.

В работе рассматривается более подробно моторная часть этой системы, включающая моторную память, эффекторы и внутренние сенсоры.

В ней можно выделить:

- уровень регулятора, обеспечивающего базовые функции управления эффекторами системы;

– уровень запоминания положений (или возможных конфигураций) системы;
– уровень запоминания паттернов (или траекторий) движения, где под траекторией понимается последовательная смена положений.

Верхние два уровня на самом деле представляют собой метауровни. Они содержат внутри себя иерархию, обобщающую из простых конфигураций все более сложные, из простых траекторий все более сложные.

Однако при создании нейроморфных систем с такой структурой возникает некоторое противоречие. Традиционные ИНС на самом деле плохо описывают биологические НС, известные нам, поскольку это не было основной задачей при их создании. И хотя можно научить ИНС на примерах действовать адекватно какой-то конкретной биологической НС, это опять же не является нашей целью. Наша цель – не научить ИНС воспроизводить поведение некоторой биологической сети как черного ящика, а понять, как функционирует известная нам биологическая НС, почему она это делает, и воплотить это понимание в ИНС для решения технических задач.

Для решения этой задачи традиционные ИНС на формальных нейронах подходят плохо. Поэтому для нейроморфных систем разрабатываются неформальные биоподобные нейроны. При их реализации наиболее часто используются следующие модели нейронов: модель Ижикевича [13], порогового интегратора [14], различные модификации модели формального нейрона [15]; модель Ходжкина – Хаксли [16], как референсная.

Указанные биоподобные модели нейронов, в свою очередь, также плохо подходят для нейроморфных систем потому, что они описывают нейрон излишне детально, обычно с точки зрения химии протекающих процессов. Невозможно адекватно анализировать работу такой сложной модели также и в силу ограниченной наблюдаемости биологических НС и трудностей в получении достаточных данных для описания ИНС с такими моделями.

Поэтому предлагается найти некий баланс, в частности разработать модель нейрона, которая будет описывать нейрон на принципах обработки импульсных потоков, которые протекают в биологических НС, но при этом не будет опускаться до уровня ионных каналов клетки. С целью повышения пластичности ИНС можно упростить разработку моделей известных биологических НС, опираясь на легко наблюдаемые в них параметры.

Такими параметрами являются:
– размер нейрона;
– длина дендритов (обобщающих и связывающих элементов);
– древовидная структура таких обобщающих элементов;
– параметры обмена информацией через импульсы.

Модель

Разработанная ранее с участием авторов модель нейрона [17, 18] отвечает указанным выше требованиям и может быть использована в качестве элемента нейроморфной системы. Структура модели нейрона представлена на рис. 2.

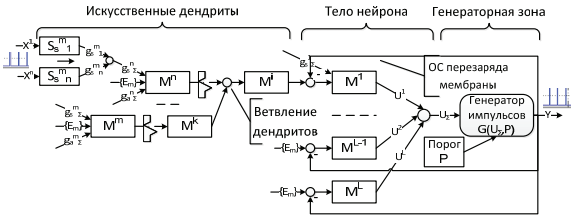


Рис. 2. Структурная схема модели нейрона

В ней можно выделить:
– синапсы, участвующие в предобработке и преобразующие импульсы в величину влияния на свой участок мембраны;
– участки мембраны, которые могут соединяться последовательно и ветвиться;
– генератор импульсов, осуществляющий формирование прямоугольного импульса в ответ на превышение состоянием нейрона некоторой пороговой величины.

Участки мембраны, охваченные отрицательной обратной связью от генератора, будем условно считать телом нейрона. Входы на теле нейрона автоматически имеют наибольший вес, но сигналы, интегрируемые на теле, теряются при генерации импульсов. Чем дальше от генератора, тем меньший вес имеют входы, но накопленный сигнал сохраняется при разрядах нейрона.

Такая модель позволяет удобно осуществлять декомпозицию всего набора входных сигналов на группы, обеспечивая их независимую предобработку, и проводить часть вычислений на участках мембраны. Таким образом, функциональным элементом нейроморфной системы становится не нейрон, а участок мембраны.

На рис. 3 приведена классификация моделей нейронов и цветом выделены признаки, отличающие разработанную модель.

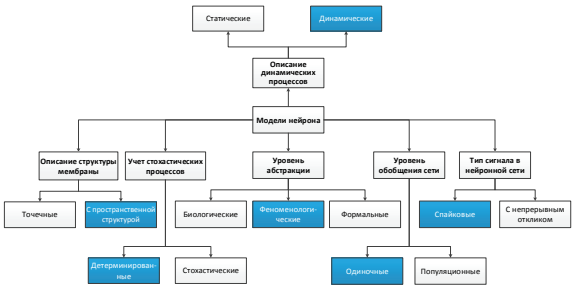


Рис. 3. Классификация моделей нейронов

Разработанная модель нейрона описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с нелинейными коэффициентами. Нелинейности большей частью представляют собой функции, переключающие пару констант в зависимости от наличия входного или выходного импульсов. Импульсы в сети представляют собой прямоугольный сигнал. Таким образом, для упрощения расчета вся система ОДУ может быть разбита на несколько отдельных систем ОДУ, связы-

ваемых по граничным условиям в моменты времени начала и завершения импульса сети. Такие системы ОДУ будут содержать независимые уравнения, что позволяет существенно упростить расчет модели нейрона и нейронной сети.

Библиотека моделирования систем со структурной настройкой

Для моделирования нейроморфных систем, структура которых может изменяться во время выполнения, не годятся существующие средства моделирования, такие как, например, Matlab Simulink. Причина – невозможность менять структуру модели во время выполнения расчета. Поэтому была разработана собственная САПР “Neuro Modeler Software Developer Kit (NMSDK)”, обеспечивающая необходимую функциональность [19].

Задачу разработки программного комплекса для моделирования нейронных сетей со структурой, изменяющейся во время выполнения, можно свести к более общей – разработке программного комплекса, позволяющего вычислять на каждом шаге алгоритм, составленный из цепочки модулей, каждый из которых решает отдельную локальную подзадачу. При этом каждый модуль имеет входные и выходные данные, параметры и переменные состояния. Каждый модуль также может быть связан с другими модулями через входы и выходы, причем структура связей может быть произвольна.

Поскольку ставится задача обеспечить возможность оперативного изменения структуры моделируемой системы, это накладывает следующие требования к архитектуре:

- необходимо иметь средства для загрузки и сохранения структуры модулей алгоритма;
- требуется обеспечить унифицированный доступ к параметрам, переменным состояния, входным и выходным данным модулей;
- необходимо иметь средства добавления новых модулей в алгоритм (из списка существующих), удаления существующих, изменения порядка расчета.

Такой подход позволяет унифицировать:

- оценку производительности модулей;
- средства тестирования модулей (поскольку имеется унифицированный доступ ко всем входным и выходным данным модуля, то можно реализовать и универсальные средства тестирования);
- средства обмена данными между алгоритмом и внешними по отношению к нему структурными элементами программного обеспечения, например интерфейсом пользователя.

Из сформулированных выше требований следует, что программное обеспечение, удовлетворяющее этим требованиям, должно иметь двухуровневую архитектуру:

- уровень ядра с универсальным программным интерфейсом;
- уровень конечного ПО, использующего библиотеку, включающего в себя коллекции алгоритмов и интерфейс пользователя.

На рис. 4 представлена схема взаимодействия основных программных модулей ядра и пользовательского приложения.

Управляющий модуль (Engine) обеспечивает функционал по инициализации и деинициализации основных модулей библиотеки: среды выполнения и хранилища объектов. Также управляющее ядро предоставляет пользовательской программе унифицированный интерфейс взаимодействия с модулями библиотеки.

Хранилище классов и компонент (Storage) предоставляет средства по управлению доступным набором компонент (решающих модулей) во время выполнения программы. Таким образом обеспечивается возможность динамической замены компонент или модификации структурной схемы модели (под моделью будем понимать алгоритм верхнего уровня, решающий поставленную пользователем задачу).

Среда выполнения (Environment), используя хранилище объектов, обеспечивает функционал по формированию структурной схемы модели, управлению отдельными компонентами модели, заданию входных данных модели для расчета и выдачу выходных данных.

Модель (Model) – часть среды, содержащая в себе собственно структуру алгоритма модели и все функции по управлению им.

Компонент (Component) – самодостаточная в рамках модели сущность. Имеет методы для связи с другими контейнерами, может содержать в себе другие компоненты. В рамках своего владельца определяется уникальным строковым именем. Для прямого доступа к вложенному компоненту можно использовать составное строковое описание вида “ComponentName1. SubComponentName2. SubComponentName3”.

Менеджер ядра обеспечивает функции инициализации элементов ядра, их первичной настройки и корректного разрушения при завершении работы.

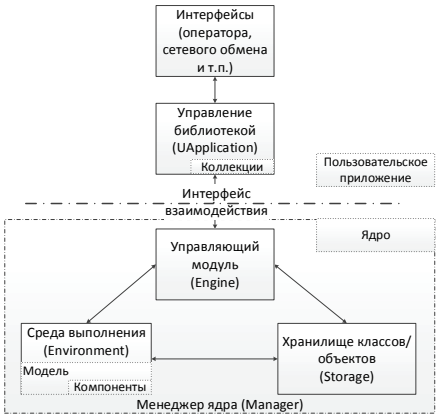


Рис. 4. Схема взаимодействия основных модулей средств моделирования

Пользовательское приложение может (не обязательно) использовать дополнительную программную прослойку (UApplication), облегчающую управление библиотекой. В этой прослойке вводится функциональность создания, загрузки и

сохранения конфигурации (конфигурация – это структура компонент модели, параметры компонент и параметры расчета), предоставляются унифицированные программные средства для выполнения циклического расчета модели в отдельных потоках, унифицированные средства удаленного управления приложением и т. п.

Разработанные программные средства имеют следующие достоинства:

- кроссплатформенное ядро, позволяющее создавать приложения для любых систем, поддерживающих стандарт C++ и имеющих реализацию библиотеки boost;
- быстрое создание новых алгоритмических решений на базе уже созданных библиотек компонент;
- унификация описания входов, выходов, параметров и переменных состояния каждого алгоритма;
- простота создания средств тестирования отдельных алгоритмов и комплексного тестирования (как следствие п. 2);
- простота создания новых компонент и коллекций;
- малые накладные расходы на взаимодействие между компонентами, реализующими отдельные алгоритмы, что позволяет создавать гибкие системы, функционирующие в реальном времени;
- пользовательский интерфейс, позволяющий проводить мониторинг и управление разрабатываемой системой.

Экспериментальное исследование

На разработанной модели был проведен ряд исследований, включающий в себя:

- анализ поведения модели в зависимости от изменения структуры мембраны нейрона;
- исследование простых кольцевых структур с положительными и отрицательными обратными связями;
- исследование применения таких структур для создания элементов нейроморфных систем.

В рамках первого этапа экспериментов, в частности, были получены зависимости средней частоты в спайке от числа импульсов в нем. На рис. 5 слева для графика *1* по оси абсцисс откладывается число импульсов в пачке N_p. График *2* демонстрирует зависимость средней частоты следования спайков от числа участков сомы нейрона L. Частота вычислялась на фиксированном интервале времени, за который был принят интервал самого длинного паттерна.

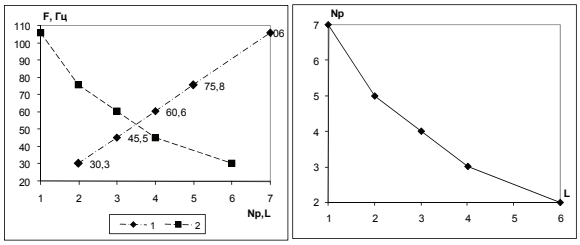


Рис. 5. Частота разрядов нейрона в зависимости от размера сомы: *1* – зависимость средней частоты от числа N_p импульсов в пачке; *2* – от числа участков сомы L (*слева*). *Справа* – зависимость среднего числа импульсов в пачке от числа участков сомы

На графике справа показана зависимость числа импульсов в спайке N_p от числа участков мембраны сомы L.

На рис. 6 показана организация дендритного и синаптического аппаратов.

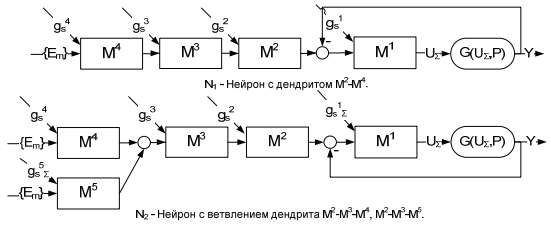


Рис. 6. Ветвление дендритов

На рис. 7 (1) показано изменение мембранного потенциала нейрона N_1 на входе генераторной зоны при возбуждении по одному входу участка мембраны соответственно: *a* – M^4, *b* – M^3, *c* – M^2, *d* – M^1. Здесь наглядно демонстрируется временная задержка и затухание сигнала при распространении возбуждения по дендриту.

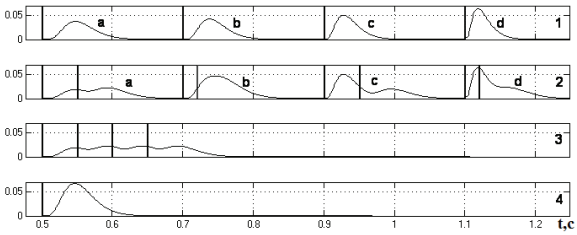


Рис. 7. Потенциалы участков мембраны в местах ветвления дендритов при возбуждении по разным входам

Рисунок 7 (2) показывает пример пространственной и временной суммации влияний входных воздействий в местах ветвления дендритов нейрона N_2. Здесь результирующее изменение мембранного потенциала получено при возбуждении в различные моменты времени одиночных синапсов на участках мембраны соответственно: *a* – M^4, M^5, *b* – M^3, M^5, *c* – M^2, M^5, *d* – M^1, M^5. Рисунок 7 (3 и 4) демонстрирует пример соответственно чистой временной и пространственной суммации сигнала на 4 синапсах (участок мембраны M^5). Здесь на (3) – M^5 последовательно возбуждается одиночными импульсами по 4 входам; на (4) – импульс одновременно активирует все 4 входа, вызывая усиленный всплеск деполяризации.

Такая модель нейрона применялась для описания кольцевых структур из двух нейронов с положительными и отрицательными обратными связями как элементов нейроморфных систем.

Выбор этих объектов обусловлен следующими причинами:

1. Отрицательные обратные связи играют важную роль в обработке информации в нервной системе. В частности, они обеспечивают распростра-

нение информации волной по слоям. При этом нейроны, возбуждаемые с предыдущего слоя, активируясь, одновременно тормозят источник своего возбуждения. Это позволяет экономить потребляемую энергию и является одним из механизмов предотвращения насыщения сети паразитной активностью. В ИНС, отвечающих за управление движением, такие структуры предотвращают разрыв мышечных волокон, ограничивая усилие, развиваемое мышцей. В нейроморфных системах такие структуры могут быть применены, например, в адаптивных регуляторах.

2. Кольцевые структуры с положительными обратными связями, представляющие собой управляемые генераторы сигналов, являются основой множества когнитивных процессов, таких как, например, память. В рамках нейроморфных систем такие структуры могут выполнять роль текущего контекста, в котором функционирует система, или активность цепочки таких структур может отражать последовательность действий во времени.

Кольцевые структуры с отрицательной обратной связью

В качестве кольцевой структуры с отрицательной обратной связью рассмотрим элемент схемы, представляющей собой широко распространенное в нервной системе соединение возбуждающего и тормозного нейронов, впервые изученное в нейрофизиологических экспериментах как взаимодействие мотонейрона, обеспечивающего сокращение мышечного волокна и клетки Реншоу (рис. 8).

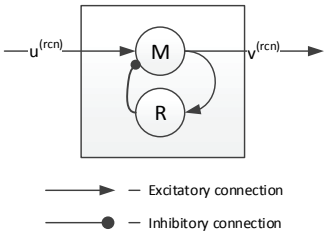


Рис. 8. Схема возвратного торможения на примере регуляции разрядов мотонейрона (M) клеткой Реншоу (R)

Существуют два механизма увеличения силы сокращения мышцы. Первый – это увеличение частоты следования импульсов на выходе мотонейрона. Второй – увеличение количества активных мотонейронов, аксоны которых соединены с мышечными волокнами данной мышцы. Специализированный тормозной нейрон в цепи возвратного торможения – клетка Реншоу – ограничивает и стабилизирует частоту разрядов мотонейрона.

Разработанная модель нейрона позволяет моделировать элементы нейроморфных систем, опираясь на легко наблюдаемые параметры биологических прототипов.

Так, клетка Реншоу, нейрон небольшого размера, генерирует характерные пачки импульсов в ответ на один разряд, приходящий на ее вход по возвратной цепи от мотонейрона. В моделируемой структуре тело нейрона состоит из одного участка мембраны M^1. Мотонейрон представляет собой крупный нейрон (рис. 9). Тело мотонейрона состоит из трех участков мембраны M^1–M^3. В данном эксперименте размеры тела нейрона подобраны эмпирически.

Поведение такой нейронной структуры в соответствии с нейрофизиологическими данными показано на рис. 10.

Графики показывают, что увеличение частоты стимуляции мотонейрона усиливает тормозное влияние с клетки Реншоу на мотонейрон, вызывая, в свою очередь, снижение частоты разрядов мотонейрона.

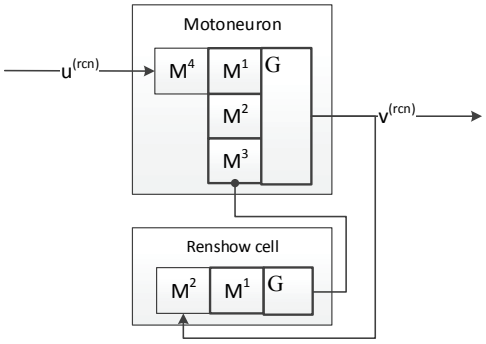


Рис. 9. Подробная стуктурная схема механизма возвратного торможения

Рис. 10. Записи импульсных потоков при исследовании взаимодействия мотонейрона и клетки Реншоу на частоте возбуждения мотонейрона 20 Гц (*а*) и 50 Гц (*б*): *1* – возбуждающий вход мотонейрона; *2* – разряды клетки Реншоу; *3* – импульсы на выходе мотонейрона. *Вверху* – отметка времени 10 мс

Таким образом, при повышении частоты стимуляции мотонейрона частота импульсов на его выходе в первые моменты растет, а затем стабилизируется на низком уровне с длительностью межимпульсных интервалов, определяемой длительностью разрядов клетки Реншоу. Существенно, что это ограничение зависит от того, находится мотонейрон под возвратным торможением клетки Реншоу или нет. Компьютерное моделирование позволило более детально исследовать взаимодействие таких нейронов. Результаты эксперимента на модели представлены на рис. 11.

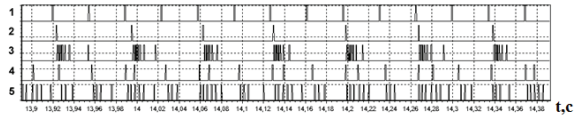


Рис. 11. Реакции структуры мотонейрон – клетка Реншоу при возбуждении мотонейронов импульсным потоком частотой 50 Гц: *1* – входной импульсный поток; *2* – реакции мотонейрона с включенной ОС; *3* – реакции клетки Реншоу с включенной ОС; *4* – реакции мотонейрона с разорванной ОС; *5* – реакции клетки Реншоу с разорванной ОС. По оси абсцисс время в секундах

Можно видеть, что наблюдается соответствие в экспериментальных данных.

Кольцевые структуры с положительными обратными связями

На рис. 12 показана структурная схема связей пары нейронов, охваченных положительной обратной связью. Такая структура в рамках нейроморфной системы может описывать, например, элемент траектории движения.

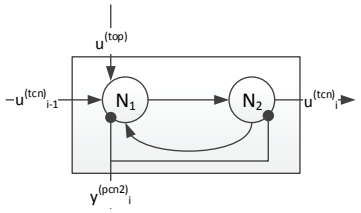


Рис. 12. Структурная схема элемента траектории

Однократное возбуждение такой структуры приводит ее в устойчивое состояние генерации. По сигналу с низшего уровня, подтверждающему достижение целевого положения, действующего одновременно на оба нейрона в кольце, структура может быть заторможена. Более подробно элемент траектории представлен на рис. 13.

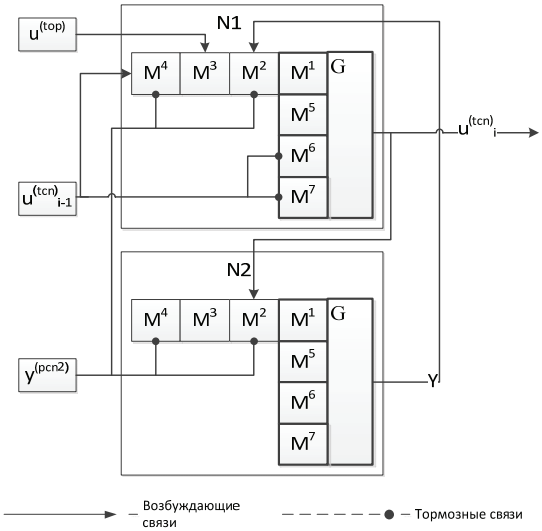


Рис. 13. Подробная структурная схема элемента траектории

Для того чтобы единственная возбуждающая связь, которой последовательно связаны такие кольцевые структуры, не приводила к фактически одновременному запуску всех элементов траектории, связь между элементами траектории использует особенности структурной организации мембраны в модели нейрона. На входе кольцевой структуры $u^{(tcn)}_{j-1}$ образуется несколько тормозных и возбуждающих синапсов. При этом тормозные синапсы располагаются по дендриту ближе к телу нейрона и поэтому имеют больший вес, но меньшее время влияния на вклад в возбуждение нейрона. А возбуждающие синапсы образуются на отдаленных участках дендритов и, соответственно, имеют меньший вес, но большее время влияния. Таким образом, в момент появления активности $u^{(tcn)}_{j-1}$, нейрон N_1 следующего i+1 элемента траектории затормаживается за счет более «сильных» тормозных синапсов, однако по пропадании активности тормозное влияние исчезает быстрее, чем остаточное возбуждение с дендритов, и происходит запуск следующей кольцевой структуры.

На рис. 14 показан результат работы схемы из трех последовательно соединенных элементов траектории.

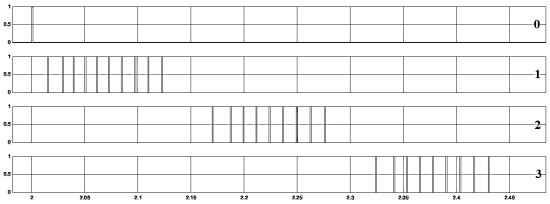


Рис. 14. Пример функционирования последовательной активации кольцевых структур, отвечающих за отработку трех элементов траектории: *0* – возбуждающий импульс с верхнего уровня; *1* – активность первого элемента траектории; *2* – активность второго элемента траектории; *3* – активность третьего элемента траектории. По оси абсцисс время в секундах

В качестве верхнего уровня управления используется задающий генератор. Нижние уровни имитируются линиями задержки. Можно видеть, что однократная активация первого элемента траектории приводит к последовательному запуску остальных элементов траектории после получения подтверждения с нижнего уровня о том, что переход в положение, заданное предыдущем элементом траектории, выполнен.

Заключение

В работе представлены модели некоторых базовых элементов нейроморфных систем на основе новой модели технического нейрона со структурной адаптацией.

На основе разработанного программного обеспечения, позволяющего моделировать нейроны и нейроморфные системы, структура которых может изменяться во время выполнения, проведен ряд экспериментов, подтверждающих адекватность функций разработанных моделей.

Разработанные модели создают уникальные структурные адаптационные возможности нейронных сетей и позволяют синтезировать нейроморфные системы, основываясь на известных биологических нейронных структурах и принципах их формирования в живой природе.

Литература

1. *Bengio Y.* Learning Deep Architectures for AI // Foundations and Trends in Machine Learning. 2009. V. 2, № 1. P. 1–12.

2. *Martinetz T., Schulten K.* A "neural gas" network learns topologies // Artificial Neural Networks. Elsevier, 1991. P. 397–402.

3. *Furao S., Hasegawa O.* An incremental network for on-line unsupervised classification and topology learning // Neural Networks. 2006. V. 19, iss. 1. P. 90–106.

4. *Kohonen T.* Self-organized formation of topologically correct feature maps // Biological Cybernetics. 1982. V. 43, № 1. P. 59–69.

5. *Pérez-Sánchez B., Fontenla-Romero O., Guijarro-Berdiñas B.* A review of adaptive online learning for artificial neural networks // Artif. Intell. Rev. 2016. doi:10.1007/s10462-016-9526-2.

6. *Garis H.* A world survey of artificial brain projects : Part I : Large-scale brain simulations / H. de Garis, Ch. Shuo, B. Goertzel et al. // Neurocomputing. 2010. V. 74. P. 3–29.

7. *Goertzel B.* A world survey of artificial brain projects : Part II : Biologically inspired cognitive architectures / B. Goertzel, L. Ruiting, I. Arel, H. d. Garis et al. // Neurocomputing. 2010. V. 74. P. 30–49.

8. *Дунин-Барковский В.Л., Соловьева К.П.* Принцип Павлова в проблеме обратного конструирования мозга // Труды XVIII Международной конференции «Нейроинформатика-2016». Ч. 1. Изд-во МИФИ, 2016. С. 11–23.

9. *Krichmar J.L.* Brain-Based Devices for the Study of Nervous Systems and the Development of Intelligent Machines / J.L. Krichmar, G.M. Edelman // Artificial Life. 2005. V. 11 (1/2). P. 63–78.

10. *Albus E.* Brain Behavior and Robotics / E. Albus. – Peterborough NH : BYTE Books, 1981. P. 352.

11. *Анохин К.В.* Проект «Мозг анимата»: разработка модели адаптивного поведения на основе теории функциональных систем / К.В. Анохин, М.С. Бурцев, И.Ю. Зарайская и др. // VIII Конференция по ИИ. М. : Физматлит, 2002. С. 781–789.

12. *Жданов А.А.* Метод автономного адаптивного управления, его свойства и приложения // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. 2004. С. 4–14.

13. *Izhikevich E.M.* Simple model of spiking neurons // IEEE transactions on neural networks: a publication of the IEEE Neural Networks Council. 2003. V. 14, № 6. P. 1569–1572.

14. *Gerstner W., Kistler W.* Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press, 2002.

15. *McCulloch W.S.* A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity / W.S. McCulloch, W. Pitts // Bulletin of Mathematical Biophysics. 1943. V. 5. P. 115–133.

16. *Hodgkin A.L.* A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve / A.L. Hodgkin, A.F. Huxley // J. Physiology. 1952. V. 117. P. 500–544.

17. *Бахшиев А.В., Романов С.П.* Моделирование процессов преобразования импульсных потоков в нейронных структурах управления мышечным сокращением // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2009. № 11. С. 70–79.

18. *Bakhshiev A.V., Gundelakh F.V.* Application the Spiking Neuron Model with Structural Adaptation to Describe Neuromorphic Systems // Procedia Computer Science. 2017. Iss. 103C. P. 190–197.

19. *Бахшиев А.В.* Библиотека средств разработки моделей нейронных сетей со сложной и динамически меняющейся архитектурой – NMSDK // Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных : материалы XVIII Всерос. семинара, 8–10 октября 2010 г. / под ред. А.Н. Горбаня, Е.М. Миркеса ; ИВМ СО РАН; отв. за вып. Г.М. Садовская. Красноярск, 2010. С. 26–30.

Об эволюционных принципах формирования когнитивных систем

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

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

К обладающим сознанием когнитивным системам человек относит, прежде всего, самого себя. Поэтому известные нам «естественные» когнитивные системы возникли на Земле в ходе планетарной эволюции, продолжающейся около 4,5 млрд. лет. При этом полная история нашего мира примерно втрое продолжительнее истории нашей планеты – она началась примерно 13,7 млрд. лет назад с Большого взрыва и последовавшего за этим космологического расширения Вселенной [1]. В итоге современные научные представления позволяют рассматривать развитие Вселенной от Большого взрыва до современности как единый эволюционный процесс, разделяющийся на несколько стадий, таких как астрофизическая, химическая, биологическая, социальная. Такие представления базируются на работах по русскому космизму таких российских ученых, как Федоров, Циолковский, Чижевский, Вернадский, а развитие представлений Большой истории можно найти в работах математика А.Д. Панова, философа А.П. Назаретяна и физика Д.С. Чернавского [2–5].

Существенные особенности эволюционного процесса и вопросы сравнительной планетологии

Строго говоря, сегодня эволюция на планете Земля является пока единственным примером, который привел к формированию «естественных» когнитивных систем. Надежды встретить внеземные когнитивные существа в Солнечной системе фактически стихли еще в 1960-годах, хотя и сегодня считается, что обнаружить разумные (когнитивные) формы жизни в окрестностях далеких звезд вполне реально. Тем не менее в последние десятилетия вектор научной мысли в этом вопросе изменился – к примеру, США объявили для себя приоритетным направлением поиск жизни* в Солнечной системе – они будут посылать космические аппараты преимущественно к тем небесным телам Солнечной системы, где шансы обнаружить жизнь наиболее велики.

Перемене в умонастроениях ведущих ученых способствовало осознание нескольких важных обстоятельств.

Во-первых, еще не так давно считалось, что вода – основной компонент привычных нам форм жизни, является достаточно редким веществом в Солнечной системе. Однако в последние годы возобладали представления о том, что на начальном этапе развития Солнечной системы воды было много повсюду, в том числе и на планетах земной группы. Океаны воды на некоторых небесных телах замерзли и сверху покрылись пылью (Марс), на других – сохранились подо льдом (Европа, Энцелад), а где-то высохли и затем были унесены из атмосферы планеты солнечным ветром (Венера).

Во-вторых, долго доминировало мнение, будто бы для возникновения жизни необходима лучевая энергия от Солнца или другой звезды, однако в 1970-х года в земных океанах на больших глубинах (4–8 км) вблизи высокотемпературных «черных курильщиков» были обнаружены очаги автономных специфических многоклеточных форм жизни.

Ключевые факторы биологической эволюции сформулированы Ч. Дарвином в 1858 г., это: 1) наследственность, 2) изменчивость, 3) естественный отбор [6].

С тех пор эти принципы подвергались сомнениям и/или уточнялись, но в целом они не вызывают сомнений. Здесь нам важно отметить такое важное следствие, как многоэтапность эволюционного процесса. Рассматриваемый временной срок в 4,5 млрд. лет оказывается совершенно недостаточным для того, чтобы из исходных атомов случайно сложилась когнитивная система, которая после этого будет зафиксирована естественным отбором по своим конкурентным преимуществам. В ряде статей отмечалось, что проблема недостатка эволюционного времени будет решена, если эволюция пройдет за несколько этапов. Например, 300 млн. лет займет процесс формирования азотистых оснований для ДНК с последующей фиксацией удачного варианта путем естественного отбора; сходный по аналогичный срок уйдет на создание самой ДНК как генетического текста с последующей фиксацией результата путем отбора, далее ситуация может многократно повториться и т. д. Количество необходимых этапов может быть грубо оценено вероятностными методами, и по приведенным в [4, 5] оценкам полтора-два десятка этапов может оказаться вполне достаточным для того, чтобы за 4,5 млрд. лет эволюция добралась до таких когнитивных систем, которые сейчас читают эти строки.

В простейшем случае поэтапность эволюции можно отразить простым ступенчатым графиком (рис. 1); по горизонтальной оси здесь откладывается время, а по вертикальной – характеристика сложности системы.

В работе [7] было отмечено, что форма эволюционных ступенек может быть и более сложной из-за «закона значительного отката перед сильным подъемом», такой пример эволюционной динамики пример показан на рис. 2, *а*. Сильный спад может не только способствовать быстрому росту разнообразия и биомассы живой системы на рас-

* Здесь речь идет о некогнитивных формах жизни, о жизни вообще.

сматриваемом небесном теле, но и привести к полной гибели жизни на нем (рис. 2, *б*). В этом случае система может не вернуться на путь эволюционного развития. Предполагается, что такого типа сценарий мог реализоваться на Венере.

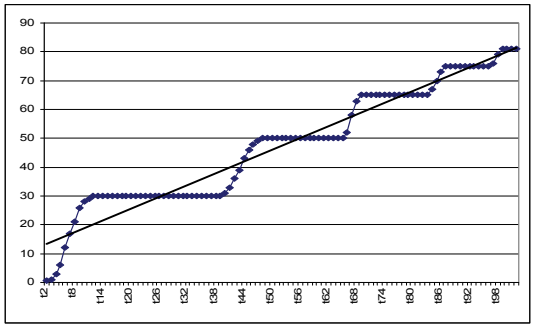
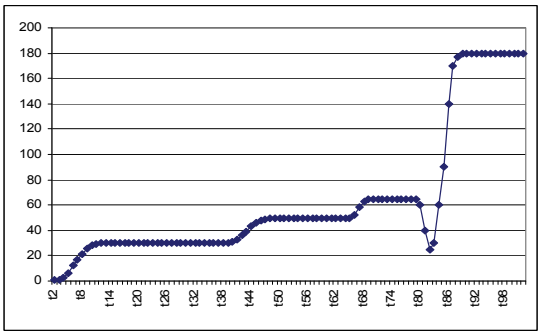


Рис. 1. Ступенчатость эволюционного процесса



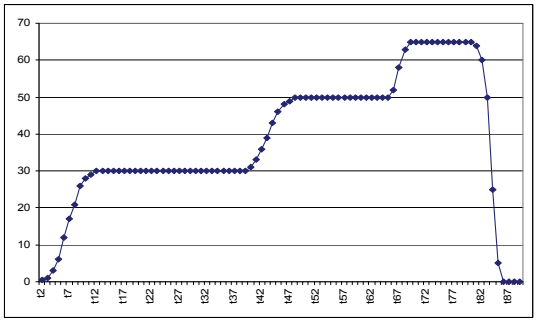


Рис. 2. Вариант резкого роста после существенного спада (*а*) и вариант эволюционного развития с полным исчезновением жизни (*б*)

Есть основания считать, что в ближайшие десятилетия появятся новые данные по небесным телам Солнечной системы, подтверждающие наличие жизни в имеющихся на ее небесных телах океанах. Строго говоря, еще больше возможностей для проверки эволюционных принципов дают экзопланеты, данные о которых в последние годы быстро нарастают.

Применение эволюционных принципов в искусственных когнитивных системах, ориентированных на решение практических задач

В последние десятилетия активно создаются искусственные интеллектуальные системы, в создании и обучении которых применяются в той или иной форме эволюционные принципы. В качестве практически важного и интересного примера, связанного с анализом изображений и использования эволюционных принципов в решении практических задач, рассмотрим детектор визуальных объектов, предложенный в работе [8]. Там для классификации фрагментов изображения предложен метод формирования качественного классификатора, который собирается из предельно простых элементов, которые будут соединяться в параллельные и последовательные структуры по некоторым правилам. На рис. 3 представлено несколько типов «рецептивных шаблонов» для рецептивных признаков, которые при наложении на изображение будут выдавать числовое значение данного признака. При этом белая часть шаблона суммирует значения пикселя изображения с коэффициентом +1, а черная – с коэффициентом –1. Поскольку каждый признак формируется путем наложения типового шаблона на изображение при разных его положениях и масштабных коэффициентах, то каждому типу признака могут соответствовать тысячи или десятки тысяч конкретных признаков (подробнее см. в [8]).

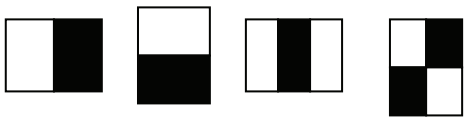


Рис. 3. Примеры шаблонов простейших признаков, используемых для поиска объектов на изображениях

На рис. 4 показано несколько примеров карт активности, возникающих при обработке лица человека подобными рецепторами. Принципиально важно, что подобная схема позволяет сформировать достаточно большое число признаков, среди которых затем на обучающей базе данных изображений можно найти лучший, т. е. такой, ошибка которого на обучающей базе данных минимальна. После этого победитель добавляется в комитет, где будет на стадии детектирования голосовать с определенным весом, зависящим от степени уверенности его победы.

После определенного «перемешивания» обучающих изображений ищется следующий лучший элемент, и следующие члены комитета будут добавляться до тех пор, пока ошибка FAR (false accept rate) не уменьшится в заранее заданное число раз (например, в десять раз).

По завершении формирования «комитета из слабых классификаторов» строится новый комитет, уменьшающий ошибку FRR (false reject rate) – количество таких компонент в структуре зависит только от наличия достаточного объема обучающих данных и вычислительного времени. Таким образом, реализуя сочетание параллельного соединения с последовательным, можно на эволюционных принципах создать из достаточно большого количества «слабых классификаторов» более сложный и надежный «сильный классификатор». Он будет иметь небольшие ошибки и первого и второго рода – FAR и FRR.

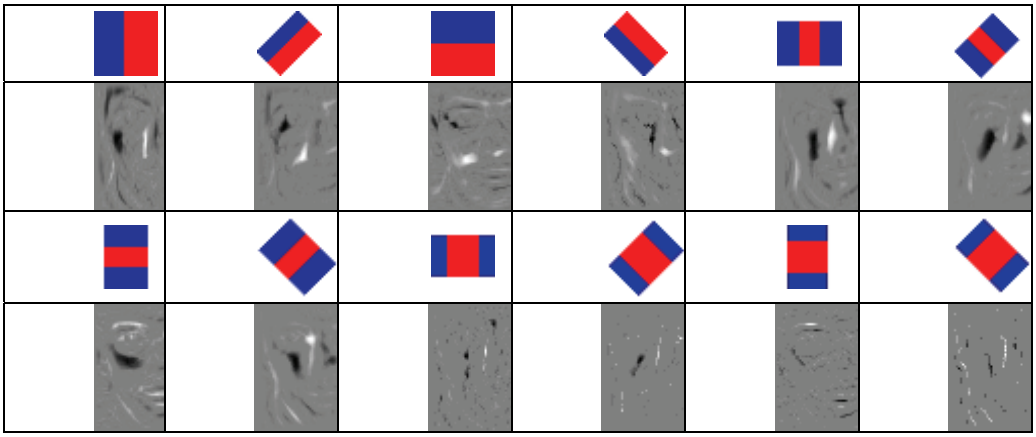


Рис. 4. Карта активности рецептивных полей для входного стимула в виде лица

Этот алгоритм сборки сложных и качественных детекторов объектов на визуальных изображениях в определенной степени аналогичен тому, как из простых молекул формируются более сложные молекулярные структуры более высокого уровня, которые затем будут использоваться многоклеточными живыми системами.

Литература

1. *Вайнберг С.* Первые три минуты. М., 1977.
2. *Панов А.Д.* Универсальная эволюция и проблема поиска внеземного разума (SETI). М., 2007.
3. *Назаретян А.П.* Цивилизационные кризисы в контексте универсальной истории. М., 2004.
4. *Чернавский Д.С., Чернавская Н.М.* «Белок – машина»: биологические макромолекулярные конструкции. М., 1999.
5. *Чернавский Д.С., Чернавская Н.М.* Принципы построения математических моделей развивающихся систем // Биофизика. 2007. Т. 54, № 1. С. 103–113.
6. *Darwin Ch.* On the Origin of Species by Means of Natural Selection. 6th ed. London : John Murray, 1885.
7. *Беллюстин Н.С., Савельев В.Ю., Сизов Ю.А.* О закономерностях эволюционной динамики систем формирующих когнитивные элементы // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды IV Всерос. конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 37–38.
8. *Paul V., Michael J.* Robust Real-time Object Detection // II International Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision : Modelling, Learning, Computing, and Sampling. Vancouver, 2001.

Влияние гипотермического воздействия на моторные функции человека

Д.В. Белощенко, К.П. Щипицин, И.В. Илюйкина, М.В. Трусов

Сургутский государственный университет

Введение

Организм человека постоянно находится в тесной взаимосвязи с состоянием окружающей среды, которая оказывает непосредственное влияние на его регуляторные системы. В условиях Севера человек вынужден прежде всего адаптироваться к холоду, особенно в холодный период года, когда организм жителей Севера находится в состоянии напряжения. Это связано с необходимостью поддерживать температурный гомеостаз на должном уровне [1, 2]. В связи с этим изменения, возникающие в различных системах организма, так или иначе сказываются на деятельности двигательной системы, отражающей поведение организма как единого целого.

В связи с этим появляется необходимость по-новому рассматривать и прогнозировать на индивидуальном и популяционном уровнях состояние функциональных систем организма человека, проживающего на территории ХМАО – Югры и для любых климатических зон проживания в целом.

В настоящей работе изучались признаки статистических различий параметров амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) треморограмм (ТМГ) путем проверки выборок ТМГ на статистическое совпадение. Использовались методы, которые позволяли обнаруживать изменения (или сходство) получаемых выборок ТМГ и функционального состояния организма человека в целом, находящегося в различных физических состояниях (до и после гипотермического (локального холодового) воздействия).

Объект и методы исследования

В настоящих исследованиях объектом для наблюдения являлись испытуемые – молодые люди (женского и мужского пола) в возрасте 25 лет, которые подвергались локальному холодовому воздействию по стандартной методике: сидя в комфортном положении, испытуемый должен был удерживать указательный палец кисти верхней правой конечности в статическом положении над токовихревым датчиком на определенном расстоянии. Показатели снимались в осенний и весенний периоды года до и после гипотермического (локального холодового) воздействия. Всего было исследовано 30 человек, которые проживали на Севере более 20 лет.

Информация о состоянии параметров непроизвольных микродвижений конечностей была получена на базе прибора «Тремограф», который обеспечивает регистрацию кинематограмм (движения пальцев руки в заданном режиме). В основе работы устройства лежат токовихревые датчики с блоками усилителей, фильтров, которые подключаются к блоку 16-канального аналого-цифрового преобразователя и позволяют прецизионно (до 0,01 мм) определять координату $x = x(t)$ положения конечности с пластинкой в пространстве по отношению к регистратору (токовихревому датчику). Регистрация сигналов смещения конечности $x_1 = x_1(t)$ и их обработка (получение производной от x_1, т. е. $x_2 = dx_1/dt$) осуществлялась с помощью программных продуктов на базе ЭВМ с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) и wavelett-анализа (Моррета) для представления непериодических сигналов в виде непрерывной функции $x = x(t)$, анализа амплитудно-частотных и фазовых характеристик сигнала [4–8].

Статистическая обработка данных осуществлялась при помощи программного пакета «Statistica 6.1». Проверка данных на соответствие закону нормального распределения оценивалась на основе вычисления критерия Шапиро – Уилка. Дальнейшие исследования производились методами непараметрической статистики. Систематизация материала и представленных результатов расчетов выполнялась с применением программного пакета электронных таблиц Microsoft Excel [1–3].

Результаты и их обсуждение

Поскольку для многих параметров гомеостаза функции распределения $f(x)$ не могут показывать устойчивость ($f(x)$ непрерывно изменяются), то возникает вопрос о целесообразности использования функций распределения $f(x)$ для ТМГ. Наблюдается их непрерывное изменение при сравнении выборок амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) параметров треморограмм, и любая ТМГ имеет свой особый закон статистического распределения $f(x)$ для каждого интервала Δt [7–10].

В результате обработки временной развертки сигнала тремора (анализ спектра периодических биомеханических показателей человека) с помощью программы «Charts 3» были получены амплитудно-частотные характеристики треморограмм в осенний и весенний периоды года до и после гипотермического (локального холодового) воздействия. С помощью анализатора сигналов в каждой выборке ТМГ (5 с регистрации) были получены 249 значений АЧХ для каждого из 30 испытуемых.

Затем с помощью пакета прикладных программ Excel MS Office-2010 было выполнено усреднение амплитуд параметров тремора на каждой частоте (от 0 до 50 Гц) – суперпозиция для 30 человек в каждой группе исследования (в осенний

и весенний периоды). Далее для каждой группы исследования по медианам амплитуд параметров треморограмм были построены АЧХ до и после локального холодового воздействия. Так как параметры тремора наиболее информативны в диапазоне до 15 Гц, для анализа АЧХ был выбран диапазон до 25 Гц, т. е. получено 250 значений амплитуд по 125 частотам в диапазоне от 0 до 25 Гц.

Для построения общей динамики АЧХ были использованы медианы (рис. 1), поскольку дискретные значения тремора имеют распределение отличное от нормального (тип распределения определяли с помощью критерия Шапиро – Уилка).

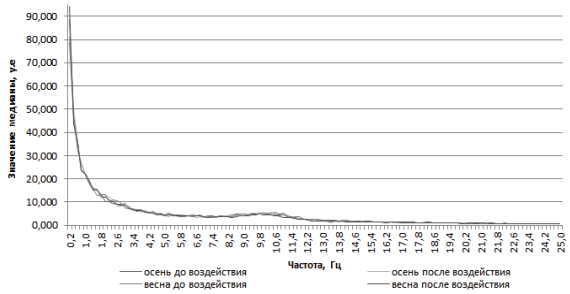


Рис. 1. Динамика медианных значений АЧХ параметров треморограмм (микродвижений пальцев кисти руки) испытуемых до и после локального холодового воздействия в весенний и осенний периоды года (суперпозиция для 30 человек) при опоре в лучезапястном суставе. По оси *y* – амплитуда в условных единицах (у.е.); по оси *x* – частота в герцах (Гц)

Следует отметить, что изменение значений медиан по частотам до и после локального холодового воздействия в группе испытуемых в осенний и весенний периоды года не имеет существенных различий. Однако амплитуда тремора в *низкочастотной области* в осенний период до холодового воздействия выше (90 у.е.), чем после локального холодового воздействия (80 у.е.), а в весенний период до холодового воздействия составляет до 80 у.е., а после локального холодового воздействия – до 100 у.е. То есть имеется обратная реакция на холодовое воздействие в разные сезоны года (рис. 2), о чем свидетельствует низкочастотная область тремора.

Также характерной особенностью всех значений медиан является наличие небольшого подъема (пика) в области 8–12 Гц, что свидетельствует о том, что нами был зарегистрирован нормальный физиологический тремор здоровых людей [3–7].

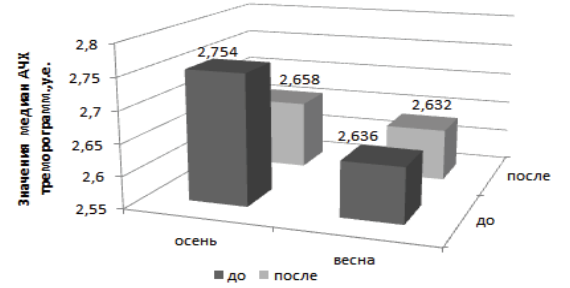


Рис. 2. Динамика (249 значений) медиан АЧХ треморограмм группы испытуемых в осенний и весенний периоды года до и после локального холодового воздействия

Следует отметить, что у группы испытуемых после локального холодового воздействия наблюдается уменьшение значений медиан АЧХ параметров треморограмм на 0,096 у.е. в осенний период (со значения Me = 2,754 у.е. до Me = 2,658 у.е.) и на 0,004 у.е. в весенний период (до воздействия Me = 2,636 у.е., а после Me = 2,632 у.е.). Также группа испытуемых в весенний период года характеризуется уменьшением значения медианы до воздействия относительно осеннего периода на 0,118 у.е. (осенью Me = 2,754 у.е., весной Me = 2,636 у.е.), и точно так же значение медианы после воздействия уменьшается на 0,026 у.е. (осенью Me = 2,658 у.е., весной Me = 2,632 у.е.).

Для выявления различий средних значений рангов медиан АЧХ треморограмм группы испытуемых в осенний и весенний периоды года до и после локального холодового воздействия (попарное сравнение 249 значений АЧХ ТМГ у 30 испытуемых в группе) использовался непараметрический критерий Вилкоксона (Wilcoxon Signed Ranks Test):

Попарные сравнения медиан АЧХ треморограмм	*N*	*T*	*Z*	*p*-уров.
Осень до – после воздействия	249	6030,000	8,379	0,000
Весна до – после	249	13630,00	1,699	0,089
Осень до – весна до	249	5994,000	8,411	0,000
Осень после – весна после	249	12413,00	2,768	0,006

Примечание: *T* – сумма положительных и отрицательных рангов. Наименьшая из двух сумм (независимо от знака) используется для расчета величины *Z*, по которой рассчитывается уровень значимости критерия; *p* – достигнутый уровень значимости при попарном сравнении с помощью критерия Вилкоксона (критический уровень значимости принят равным $p < 0,05$).

Анализ таблицы показал, что для АЧХ параметров тремора статистически значимыми были различия при сравнении медиан до (Me = 2,754 у.е.) и после (Me = 2,658 у.е.) локального холодового воздействия в осенний период, так как значения критерия Вилкоксона составляют: $T = 6030,000$, $Z = 8,379$ и $p = 0,000$. При сравнении медиан АЧХ параметров тремора до (Me = 2,636 у.е.) и после (Me = 2,632 у.е.) локального холодового воздействия в весенний период года статистически значимых различий обнаружено не было, о чем свидетельствуют значения критерия Вилкоксона, которые составляют: $T = 13630,00$, $Z = 1,699$ и $p = 0,089$. Также критерий Вилкоксона показал статистически значимые различия в медианах АЧХ треморограмм при сравнении осеннего и весеннего периодов до ($T = 5994,000$, $Z = 8,411$ и $p = 0,000$) и после локального холодового воздействия ($T = 12413,00$, $Z = 2,768$ и $p = 0,000$).

Таким образом, была обнаружена сезонная динамика параметров тремора, т. е. было получено статистически значимое различие в АЧХ параметрах тремора без какого-либо воздействия и с локальным холодовым воздействием, причем в связанных выборках (в эксперименте участвовали одни и те же люди в разные сезоны года).

Заключение

Тремор является характерным примером хаотической динамики поведения параметров НМС как сложной биосистемы. Параметры тремора ($x_1(t)$, $x_2(t)$ и $x_3(t)$) демонстрируют неповторимую динамику, которую невозможно изучать в рамках традиционной науки, т. е. детерминизма или стохастики. Функции распределения $f(x)$ непрерывно изменяются у каждого испытуемого, а значит, любые статистические результаты имеют ежесекундный (для тремора) характер изменения (хаотического).

Статистический анализ параметров треморограмм до и после локального холодового воздействия демонстрирует определенную статистическую закономерность: образуются выборки с непараметрическим типом распределения, которые существенно отличаются до и после гипотермического воздействия. ТМГ у группы испытуемых до локального холодового воздействия отличаются от ТМГ после локального холодового воздействия. Об этом свидетельствуют полученные статистически достоверные результаты.

Новые методы исследования функциональных систем организма человека на Севере могут быть использованы для оценки влияния холода на индивидуальный функциональный резерв человека. Изучение состояния механизмов регуляции, определение степени напряжения регуляторных систем имеют большое значение для оценки особенностей адаптации организма человека, проживающего на территории ХМАО – Югры. В этом случае значения критерия Вилкоксона показывают существенные различия между состоянием НМС до охлаждения и после такового ($p = 0{,}00$).

Литература

1. *Баженова А.Е., Башкатова Ю.В., Живаева Н.В.* Хаотическая динамика ФСО человека на Севере в условиях физической нагрузки. Тула, 2016. 318 с.

2. *Еськов В.В., Филатов М.А., Филатова Д.Ю., Прасолова А.А.* Границы детерминизма и стохастики в изучении биосистем complexity // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 1. С. 83–91.

3. *Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатов М.А., Еськов В.В.* Эффект Еськова – Зинченко опровергает представления I.R. Prigogine, J.A. Wheeler и M. Gell-Mann о детерминированном хаосе биосистем complexity // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, № 2. С. 34–43.

4. *Еськов В.М., Гудков А.Б., Баженова А.Е., Козупица Г.С.* Характеристика параметров тремора у женщин с различной физической нагрузкой в условиях севера России // Экология человека. 2017. № 1. С. 38–42.

5. *Зилов В.Г., Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В.* Экспериментальное подтверждение эффекта «Повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2017. № 1. С. 4–9.

6. *Зинченко Ю.П., Хадарцев А.А., Филатова О.Е.* Введение в биофизику гомеостатических систем (complexity) // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 3. С. 6–15.

7. *Филатова О.Е., Козлова В.В., Белощенко Д.В., Прасолова А.А.* Стохастическая и хаотическая оценка параметров нервно-мышечной системы человека в осенний и весенний периоды года // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2015. № 4. С. 42–50.

8. *Betelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A., Gavrilen-ko T.V.* Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems // Doklady Mathematics. 2017. V. 95, № 1. P. 92–94.

9. *Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Vochmina Yu.V.* Formalization of the Effect of “Repetition without Repetition” Discovered by N.A. Bernshtein // Biophysics. 2017. V. 62, № 1. P. 143–150.

10. *Eskov V.M., Bazhenova A.E., Vochmina U.V., Filatov M.A., Ilyashenko L.K.* N.A. Bernstein hypothesis in the Description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // Russian Journal of Biomechanics. 2017. V. 21, № 1. P. 14–23.

Неопределенность окружающей среды как фактор обучения и структурообразования нелинейных динамических систем

Е.Н. Бендерская

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Во многих исследованиях полагается, что мозг является сложной нелинейной динамической системой. Об этом свидетельствуют нейрофизиологические данные и результаты исследования мозга самыми разными методами. Главный вопрос – зачем мозг так сложно устроен, что до сих пор цельная общепринятая теория о работе мозга находится только на этапе разработки, несмотря на давние усилия ученых всех стран. Основной ответ, который выглядит достаточно правдоподобным, – для того, чтобы работать с любой неопределенностью и адаптироваться к заранее неизвестной окружающей среде, которая, в свою очередь, тоже является нелинейной динамической системой. Если предположить, что окружающая среда полностью детерминирована и все в ней полностью известно заранее, то не было бы необходимости в механизмах адаптации и структурообразования систем, так как всегда была бы годна одна и та же, может быть, тоже сложная, но явно более просто идентифицируемая система.

Понимание основных механизмов работы мозга помогает продвигаться по пути создания сильного искусственного интеллекта (ИИ). Многие ученые скептически относятся к вопросам моделирования мозга и считают, что задачи ИИ специфичны по сравнению с «неинтеллектуальными» и методы их решения могут развиваться без оглядки на то, как это происходит в природе. Однако уровень сложности задач, подлежащих решению, неуклонно растет, и требуются новые и новые методы для их решения. И опять встает вопрос, как и когда-то на заре ИИ, – где предел возможностей в решении интеллектуальных задач и что есть интеллект. Хорошо известно, что многие интеллектуальные задачи в области искусственных технических систем по сути интеллектуальными для человека не являются и легко решаются в каждодневной жизни. Здесь уместно вспомнить, что ИИ как научное направление возник при попытке формализовать человеческое мышление и восприятие. Возможность создания истинного ИИ – системы, способной воспринимать и обрабатывать информацию с теми же свойствами, что и человеческое мышление и восприятие, остается открытым.

Конечно, для некоторых задач необходимо знание процессов, протекающих на достаточно низком уровне, но это не всегда позволяет выйти на более высокий уровень и увидеть всю систему в целом для задач комплексных. Возможно, что развитие вычислительной техники наряду с явно положительными аспектами привнесло и не совсем желательную составляющую – появилась возможность экстенсивного перебора вариантов в поисках похожего на правильное решение, но в результате больше времени уделяется накоплению данных и поиску решения с помощью подбора, что можно сделать и не обладая особой интеллектуальностью. В результате акцент исследований все больше смещается в сторону эксперимента. Теоретическое обобщение и интерпретация со всеми необходимыми согласованиями с теориями других уровней отступают на второй план.

Однако бурное развитие вычислительной техники, наращивание мощности процессорных устройств вряд ли поможет в реализации ИИ, так как частоты работы мозга несоизмеримо меньше частот вычислительных процессоров и ориентирован мозг в большей степени на решение не арифметических, не вычислительных задач, о чем упоминалось не раз в разных работах. Мозг скорее работает с неточными, недоопределенными, неявными образами и «решает» примерно. Во всяком случае до момента осознания, когда подключается осмысление. То, что решение приходит раньше, чем мы его осознали и озвучили, и выполнили, нейрофизиологи выявили уже давно.

Десятки сотен проектов, направленных на исследование принципов функционирования головного мозга человека, также способствовали становлению новой предметной области – нелинейной динамики. Нелинейная динамика – часть синергетики, которая изучает коллективное поведение множества нелинейных объектов (квантов, атомов, молекул, клеток (в частности, нейронов), подсистем). Одним из направлений в нелинейной динамике является изучение проявления самоорганизации в синхронизации хаотических систем.

Изучение явления синхронизации, этого фундаментального явления природы, ведется в таких областях, как биохимия, биофизика, квантовая физика, нейропсихология, нейрофизиология, нейробиология. Исследования все более приобретают междисциплинарный характер, поскольку все связано со всем и закономерности, которые выявляются в поведении и функционировании элементов одной природы, иногда могут быть использованы для управления элементами другой природы. Как показывают многочисленные исследования в области нелинейной динамики – чем сложнее задача, тем сложнее динамика системы, а следовательно, и управление ею. Поэтому все больше работ посвящено объединению достижений в области нелинейной динамики, самоорганизации и теории нейронных сетей.

При разработке новых высокопроизводительных систем на основе принципов самоорганизации предполагается, что решение задачи и соответствующая структура для ее решения самоорга-

низуются, используя внутренние процессы в системе и обратную связь с внешней средой, – классических задач низкоуровневой функциональной декомпозиции в данном случае не возникает. Более того, использование синергетического синтеза также предполагает отсутствие классического разделения в вычислениях на аппаратную и программную части.

Желание обобщить накопленный опыт решения частных задач и получить более универсальные системы приводит к необходимости работы с неопределенными моделями – моделями, в которых присутствует неопределенность той или иной природы – вероятностная, лингвистическая или другая [1–4].

Локальность решения или, иначе, его частность часто не позволяет решить задачу с высоким качеством. Модели с наличием внутренней неопределенности более адекватны реальным сложным задачам в динамическом мире [2, 5, 6] так же, как фрактальная геометрия более близка к описанию объектов реального мира по сравнению с «прямолинейной» геометрией. Нелинейные системы являются наиболее общим случаем моделей, с их помощью можно адекватно представить большинство объектов реального мира. Надо отметить, что все три составляющие: нелинейность, фрактальность и неопределенность, а также, как следствие, «нелокальность» (общность), самоорганизация и синхронизация, являются частями одного общего явления – сложной системы и выступают в роли ее атрибутов [5–7]. Как неоднократно указывалось в ряде работ, настоящее время характеризуется «утратой простоты» [8], «концом определенности» [1] и переходом к действительно сложным самоорганизующимся моделям, позволяющим решать более сложные задачи в условиях полной неопределенности [9–11].

Для того чтобы преодолеть неопределенность в исходных данных при решении задачи, или учесть наличие неопределенности в данных, или получить решение более универсальное, чем для частного случая, связанного с определенными ограничениями и допущениями на условия решения задачи, необходимо эту самую неопределенность ввести в саму систему (метод), на основе которой предполагается решать задачу. Это может быть сделано разными способами.

Обобщенное представление возможных подходов разрешения информационной неопределенности может быть представлено в виде схемы (рисунок). Вариант классических подходов, чаще всего локальных, частных, работающих в условиях различных допущений и ограничений, представлен на рис. *а*. Эти допущения, которые могут и не подтвердиться в некоторых случаях, и ограничения представлены условно в виде стрелок, ограничивающих область решений за счет разрешения неопределенности в том виде, который позволяет предложить строгие математические решения задачи (при выполнении определенных условий). Классический подход состоит в упрощении и редукции моделей: линеаризация, применение гипотезы о наличии гауссовых шумов, фильтрация помех, понижение порядка модели, снижение размерности задачи, дискретизация по уровню и по времени и т. п.

В качестве допущений может выступать, например, допущение об отсутствии корреляций или допущение о наличии того или иного вида распределения, которое обеспечивает сходимость метода и т. д., а ограничениями могут быть, например, предположение о линейности, или о статичности модели, или о наличии только помех в виде белого шума и т. п.

Налицо сужение условного множества возможных решений за счет конкретизации, локализации (преодоления неопределенности) моделей. Если все условия (предположения и ограничения) верны, то это будет оптимальным решением, иначе квазиоптимальным (при робастности конкретного примененного метода), или может оказаться вообще неверным. Здесь мы видим, что отсутствие априорной информации в задаче (неопределенность) заменяется проверкой выполнения некоторых условий и, таким образом, последовательным уточнением недостающей информации. Это, к сожалению, не всегда возможно, особенно в случае динамических систем, у которых можно наблюдать изменение не только параметров модели, но и ее структуры, и класса моделей с течением времени.

Потребность в решении задач в условиях неопределенности приводит к необходимости иметь общий метод решения задач, не зависящий от конкретных условий применения. Требование общности метода входит в противоречие с тем, что запас по степеням свободы (информационная емкость нейронной сети, например) может быть отрицательным фактором при решении простых задач, а зачастую от того, как раскроется неопределенность, зависит, будет решаемая задача относиться к классу сложных или к классу простых. Поэтому общий метод должен динамически подстраиваться под решаемую задачу.

Предлагаемый подход базируется на идее первоначального расширения пространства поиска решений за счет дополнительных размерностей – например, за счет включения временной составляющей (для задач, чаще всего рассматриваемых как статические), или за счет включения в модель дополнительной известной случайной составляющей (рандомизация), или за счет придания нелинейности системе для получения эффектов детерминированного хаоса и самоорганизации (дополнительные инварианты). Такой подход основывается на известных к настоящему времени реакциях и способах адаптации, присущих природным явлениям и являющихся достаточно универсальными с точки зрения формирования структуры адекватной сложности подлежащей решению задачи.

Надо отметить, что идея рассмотрения множества вариантов не нова (коллективы решающих правил, также и различные методы введения дополнительной искусственной переменной, и т. п.).

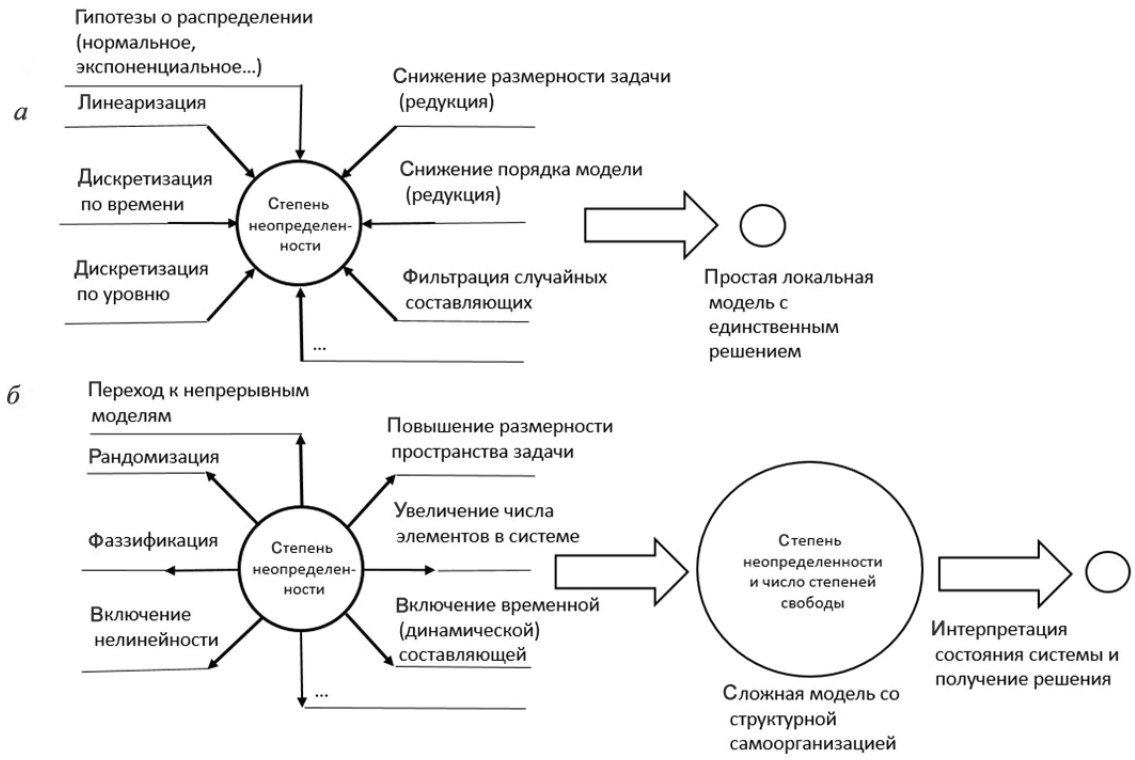


Рис. Возможные подходы к преодолению неопределенности: *а* – классический подход, *б* – новый подход

Однако в данном случае отличительной черной является не только одновременное сосуществование множества вариантов, как, например, в генетических алгоритмах, предполагающих последовательный перебор различных комбинаций (во многом искусственных), но и их конкуренция, взаимодействие и образование новых вариантов. Более важно придание дополнительных степеней свободы для осуществления самоорганизации, формирования естественной структуры, которая соответствует как динамике внутренних процессов объекта, так и входным воздействиям внешней окружающей среды. В этом случае мы получаем единую систему «объект – среда». Дополнительные степени свободы, вводимые в систему, в предлагаемом подходе представлены на рис. *б* условно стрелочками. Платой за использование процессов самоорганизации является достаточно сложный процесс интерпретации состояний полученной системы.

Гениальная догадка о необходимости наличия элементов со случайными составляющими была доказана во многих работах и в приложении к решению самых разных задач (рандомизированные методы и случайный поиск). Поиск способов отступления от детерминированного поведения для получения некоторой непредсказуемости в поведении системы, что в определенной степени соответствует поведению человека и способствует получению неординарных решений, продолжается и сегодня. Один из возможных подходов – использование нелинейных элементов с хаотической динамикой. В этом случае, как показано во многих работах, как раз возникают сложные режимы функционирования, допускающие образование новых состояний в системе.

Предлагаемый подход основывается не столько на хаосе, сколько на явлении самоорганизации, которая возможна преимущественно в условиях хаотической динамики. Изучением самоорганизации занимается синергетика, поэтому подход может быть назван синергетическим.

Синергетический подход предполагает максимальное приближение к особенностям объекта и дальнейшую работу со сложными нелинейными стохастическими непрерывными моделями высокого порядка с огромным числом элементов и сложными взаимосвязями. В этом случае модель оказывается адекватной не только в частности (для локальных условий задачи), но и в общем.

Сложность предлагаемого подхода переносится с выбора ограничений и гипотез (это в классическом подходе) на выбор методов обработки и интерпретации динамики системы, как, например, в резервуарных вычислениях. Это еще один из примеров введения сложной динамики для решения задач распознавания образов.

Отметим, что при решении простых задач, не обладающих неопределенностью, для которых известен требуемый уровень детализации модели, необходимости переводить к сложным моделям нет, и более эффективным будет использование хорошо зарекомендовавших себя моделей соответствующего уровня (микроуровня, мезоуровня, макроуровня или метауровня).

Можно говорить о вычислениях на грани хаоса и порядка, так как если рассматривать хаотическую динамику с позиций полезного хаоса и бесполезного, то хаотическая динамика, переходящая в турбулентную динамику, становится бесполезной. Полезной является хаотическая динамика, обеспечивающая самоорганизацию и как резуль-

тат структурообразование и упорядоченность. Необходимо заметить, что изначально упорядоченная динамика, такая как регулярная, со структурообразующей точки зрения также менее полезна, хотя процессы синхронизации также могут быть использованы для решения прикладных задач в частных случаях (при наличии априорной информации, т. е. при меньшей неопределенности).

Примеры мультивариативности правильных ответов на один и тот же вопрос и, как следствие, необходимость учета контекста и предпочтений – что наиболее важно в той или иной ситуации (или что более адекватно в данном контексте), должно служить базой для образования параметров внимания и порядка, предложенных в работах Хакена.

Поэтому использовать данный метод имеет смысл в случае невозможности использовать уже хорошо зарекомендовавшие себя классические методы преодоления неопределенностей и при наличии системы с большим числом элементов и множественными связями, в которой можно обеспечить процессы самоорганизации.

Таким образом, основополагающую роль в построении интеллектуальных систем начинает играть хаотическая динамика в связи со следующим:

– это базис для возникновения самоорганизации в системе;

– сложность системы становится адекватна сложности решаемой задачи;

– биологические системы обладают предельно неустойчивой динамикой.

Применение предлагаемого подхода позволит обеспечить выполнение требований к системам, разрабатываемым в рамках универсального метода решения задач:

– автономность;

– ослабление зависимости от априорной информации;

– адаптация.

Достигаемые при этом преимущества:

– подстройка под решаемую задачу за счет динамики элементов системы;

– отличие новой информации от уже известной и обучение в процессе;

– комплексное восприятие образов;

– учет контекста (временного и пространственного).

Трудности в использовании подхода связаны с необходимостью управления хаотической динамикой и дальнейшей ее интерпретацией с позиций состояний системы.

Основной проблемой при реализации нового подхода является подбор или создание адекватной аппаратной базы. Для решения задач моделирования нового высокопроизводительного вычислителя на нелинейных элементах можно использовать высокопроизводительные программируемые логические схемы. Однако для получения системы, в которой смогут быть реализованы все свойства коллективного поведения элементов и решены задачи самосборки на кластеры, т. е. выполнена реконфигурация для адаптации под изменения в окружающей среде, необходимо искать адекватную аппаратную базу. В качестве одного из возможных вариантов реализации могут быть предложены реакционно-диффузионные среды, и тогда можно будет говорить о создании «жидкого» или химического высокопроизводительного вычислителя.

Предлагается концепция решения задач с привлечением элементов расширения пространства возможных вариантов решений и последующего подключения при необходимости самоорганизованного образования структур, обеспечивающих считывание полученных решений. Данная концепция названа концепцией хаотизации систем и предназначена для реализации вычислений на границе «порядок – хаос» с помощью обеспечения условий самоорганизации и получения функционально специализированных структур, что согласуется с теорией функциональных систем П.К. Анохина [12].

Литература

1. *Пригожин И.* Конец определенности. Ижевск : РХД, 2001. 216 с.
2. *Zbilut J.P., Giuliani A.* Biological uncertainty // Theory in Bioscience. 2008. № 127. P. 223–227.
3. *Wolfram S.* A New Kind of Science. Champaign : Wolfram Media. Inc., 2002. 1197 p.
4. *Benderskaya E.N.* Nonlinear Trends in Modern Artificial Intelligence: A New Perspective // Beyond AI: Interdisciplinary Aspects of Artificial Intelligence. Topics in Intelligent Engineering and Informatics. Springer, 2013. V. 4. P. 113–124.
5. *Хакен Г.* Синергетика. М. : Мир, 1980. 406 с.
6. *Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю.* Синхронизация: Фундаментальное нелинейное явление. М. : Техносфера, 2003. 496 с.
7. *Zak M.* Quantum-inspired resonance for associative memory // Chaos, Solitons and Fractals. 2009. № 41. P. 2306–2312.
8. *Моисеев Н.Н.* Расставание с простотой. М. : Аграф, 1998. 480 с.
9. *Wessnitzer J., Adamatzky A., Melhuish C.* Towards Self-Organising Structure Formations: A Decentralized Approach // Advances in Artificial Life. Lecture Notes in Computer Science. 2001. V. 2159. P. 573–581.
10. *Галушкин А.И.* Нейронные сети: основы теории. М. : Горячая линия – Телеком, 2010. 496 с.
11. *Benderskaya E.N.* Nonlinear Dynamics as a Part of Soft Computing Systems: Novel Approach to Design of Data Mining Systems // Recent Advances on Soft Computing and Data Mining. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, 2014. V. 287. P. 303–312.
12. *Анохин П.К.* Кибернетика функциональных систем // *Анохин П.К.* Избр. труды / под общ. ред. К.В. Судакова. М. : Медицина, 1998. 397 с.

Произвольные и непроизвольные движения с позиции компартментно-кластерного подхода

Д.К. Берестин, Н.Ш. Алиев, Д.Т. Иржанова, А.Д. Шейдер

Сургутский государственный университет
bdk0720@gmail.com

Введение

Принципиальная непредсказуемость и неповторимость динамики поведения сложных динамических систем (систем третьего типа – complexity) обусловлена особыми свойствами сложных биологических динамических систем, которые мы сейчас определяем как системы третьего типа. В современной теоретической биофизике системы третьего типа определяют как complexity, но при этом нет строгого определения этих систем и их свойств. Особенностями таких сложных биосистем являются их компартментно-кластерная структура и состояние постоянного мерцания (glimmering property), когда вектор состояния системы $x = x(t)$ непрерывно демонстрирует движение в виде $dx/dt \neq 0$. Каждый раз регистрируемые показатели (сигналы) уникальны, и более того, уникальностью обладает каждый временной участок регистрируемого динамического сигнала. Для решения задачи моделирования таких особых систем была использована трехкомпартментная двухкластерная математическая модель, которая может описывать динамику поведения различных функциональных систем организма человека, и в частности нервно-мышечной системы (НМС). Изменяя параметры модели, мы изменяем интенсивность драйва, тогда мы можем получить характеристики переменных x_i с хаотической динамикой поведения всего вектора состояния системы. Это соответствует произвольным (теппинг) и непроизвольным (тремор) движениям в различных физиологических условиях испытуемого [3–6].

Специфика хаоса в НМС с позиций кластерного описания

Для моделирования таких сложных систем мы сейчас применяем компартментно-кластерную теорию биосистем (ККТБ). Любые сложные биологические динамические системы (БДС), образующие организм человека, популяции животных или биосферу Земли, в целом являются уникальными и не воспроизводимыми точно системами, которые мы сейчас определяем как системы третьего типа (СТТ). С точки зрения детерминистского подхода многократное повторение любого такого процесса должно обеспечивать идентификацию моделей биологической динамической системы в фазовом пространстве состояний [1, 5]. Однако если биосистемы точно воспроизвести невозможно, то мы переходим к стохастике, т. е. к определению статистической функции распределения биопроцесса $f(x)$. При этом и стохастика всегда требует повторения начальных параметров процесса, в котором его конечный результат все-таки будет флуктуировать около среднего значения [1, 2]. Однако для СТТ мы не можем использовать понятие флуктуации (нет среднего значения, моды и медианы не устойчивы), что и показывается в настоящем сообщении на примере систем третьего типа – СТТ [1]. При помощи построения матрицы попарного сравнения выборок [5, 7], которые получаются на модели в виде значений функций выхода $y = y(t)$ при сравнении 15 участков моделируемых сигналов друг с другом при различных коэффициентах диссипации b_1 и управляющего драйва Ud была определена чувствительность модели.

Таблица 1

Матрица парного сравнения выборок модельных треморограмм при хаотическом изменении коэффициента диссипации b_1 для больших интервалов (вариаций) изменения $b_1 \in [1{,}14;\ 3{,}07](k_1 = 3)$

b_1	2,73	2,21	1,37	2,18	1,56	1,87	1,39	2,06	1,24	1,14	1,5	3,09	2,65	3,07	3,04
2,73		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
2,21	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,29	,00	,00	,00	,01	,00	,00	,00
1,37	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
2,18	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
1,56	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,66	,00	,00	,00	,00
1,87	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
1,39	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
2,06	,00	,29	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,09	,00	,00	,00
1,24	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00
1,14	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00
1,5	,00	,00	,00	,00	,66	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00
3,09	,00	,01	,00	,00	,00	,00	,00	,09	,00	,00	,00		,00	,00	,00
2,65	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00
3,07	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00
3,04	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	

Таблица 2

Матрица парного сравнения выборок модельных треморограмм при хаотическом изменении коэффициента диссипации b_1 для малых интервалов (вариаций) изменения $b_1 \in [1{,}5; 1{,}7]$ ($k_2 = 11$)

b_1	1,55	1,5	1,69	1,64	1,59	1,63	1,58	1,68	1,65	1,62	1,52	1,53	1,54	1,7	1,68
1,55		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
1,5	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,92	,06	,00	,00	,00
1,69	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,59	,00
1,64	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
1,59	,00	,00	,00	,00		,09	,00	,00	,00	,15	,00	,00	,00	,00	,00
1,63	,00	,00	,00	,00	,09		,00	,00	,00	,10	,00	,00	,00	,00	,00
1,58	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,06	,69	,00	,00
1,68	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,06	,00
1,65	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00	,00
1,62	,00	,00	,00	,00	,15	,10	,00	,00	,00		,00	,00	,00	,00	,00
1,52	,00	,92	,00	0,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00		,33	,03	,00	,00
1,53	,00	,06	,00	0,00	,00	,00	,06	,00	,00	,00	,33		,18	,00	,00
1,54	,00	,00	,00	0,00	,00	,00	,69	,00	,00	,00	,03	,18		,00	,00
1,7	,00	,00	,59	0,00	,00	,00	,00	,06	,00	,00	,00	,00	,00		,00
1,68	,00	,00	,00	0,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	

Матрица попарного сравнения выборок (модельных треморограмм) при разных значениях коэффициента диссипации b_1 представлена в таблице 1. При этом задание b_1 для наименьшей выборки было получено хаотично, т. е. выбиралось значение $b_1 \in [1{,}14; 3{,}07]$. Именно изменение интервала b_1 и характеризует вмешательство сознания в работу НМС. Это приводит к нарастанию стохастики (у нас числа k).

Моделирование теппинга с позиции ККТБ (как произвольных движений)

В табл. 2 (модельные данные) мы искусственно уменьшили интервал изменения b_1 (это имитирует сознание, работу ВНД), и при этом у нас резко возросло число k совпадений пар выборок x_i (теперь это не треморограммы и теппинграммы). Сознание всегда уменьшает разброс степеней свободы в НМС.

Были проведены эксперименты, где регистрировались тремор и теппинг для одного и того же испытуемого (без изменения его функционального состояния) с многократным повторением регистрации тремора (в каждом, одном эксперименте время измерения T = 5 с). Попарное сравнение полученных выборок треморограмм и теппинграмм для каждого испытуемого на предмет принадлежности всех этих выборок к общей генеральной совокупности, которые оценивались в виде матрицы по критерию Вилкоксона (у одного и того же испытуемого), демонстрирует различия $k_{\text{трем}}$ тремора и $k_{\text{теп}}$ теппинга (всегда $k_{\text{теп}} > k_{\text{трем}}$). Иными словами, две соседние выборки не могут демонстрировать схожесть их функций $f(x)$ в матрицах парных сравнений выборок треморограмм и теппинграмм для одного испытуемого для полученных подряд выборок. В результате было получено, что число совпадений k в матрице парных сравнений выборок теппинграм для одного испытуемого $k_{\text{теп}} = 15$, а для матрицы парных сравнений треморограмм число совпадений $k_{\text{трем}} = 5$.

Такие результаты можно сравнить с модельными треморграммами, т. е. с табл. 1 и табл. 2, где число совпадений различно ($k_1 = 3$, $k_2 = 11$). С позиции модели регуляции НМС (со стороны ВНД) мы предполагаем, что хаотичные интервалы выборок (у нас для b_1) в моделях ККТБ начинают сужаться из-за сознательного управления со стороны ЦНС. На модели было установлено отсутствие возможности произвольного повторения не только двух произвольных движений, но и двух одинаковых серий таких (якобы произвольных) движений.

Компартментно-кластерная модель позволяет описать оба вида рассмотренных нами движений и объяснить механизм увеличения числа совпадений пар выборок k при теппинге. Именно такие математические модели и должны приблизить мир теоретических (модельных) динамик к миру реальных биомедицинских систем. В нашем случае речь идет о моделях НМС с позиций ККТБ.

Литература

1. *Бетелин В.Б., Еськов В.М., Галкин В.А., Гавриленко Т.В.* Стохастическая неустойчивость в динамике поведения сложных гомеостатических систем // Доклады академии наук. 2017. Т. 472, № 6. С. 642–644.

2. *Еськов В.М., Филатова О.Е., Хадарцева К.А., Еськов В.В.* Универсальность понятия «гомеостаз» // Клиническая медицина и фармакология. 2015. № 4 (4). С. 29–33.

3. *Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатова О.Е., Веракса А.Н.* Биофизические проблемы в организации движений с позиций теории хаоса – самоорганизации // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, № 2. С. 182–188.

4. *Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В.* Формализация эффекта «повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Биофизика. 2017. Т. 62, № 1. С. 168–176.

5. *Еськов В.М., Гудков А.Б., Баженова А.Е., Козупица Г.С.* Характеристика параметров тремора у женщин с различной физической нагрузкой в условиях севера России // Экология человека. 2017. № 3. С. 38–42.

6. *Еськов В.М., Баженова А.Е., Вохмина Ю.В., Филатов М.А., Иляшенко Л.К.* Гипотеза Н.А. Бернштейна в описании хаотической динамики непроизвольных движений человека // Российский журнал биомеханики. 2017. Т. 21, № 1. С. 18–28.

7. *Зилов В.Г., Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В.* Экспериментальное подтверждение эффекта «Повторение без повторения» Н.А. Бернштейна. // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2017. № 1. С. 4–9.

Автоматическая оценка мотивационных критериев с использованием психографических тестов

А.А. Бовырина[1], А.А. Тельных[2]

[1] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2] Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
telnykha@yahoo.com

Иногда для измерения уровня мотивации человека используется так называемый «Психографический тест», который был разработан в 1992 году В.Г. Леонтьевым [1]. Этот тест базируется на представлении о чистом листе бумаге с рамкой как о некотором пространстве, в котором размещены стремления человека к тем или иным видам деятельности. Испытуемому предлагается указать точкой, где на этом чистом листе бумаги находится его стремление к тому или иному виду деятельности, обозначить стрелкой, откуда это стремление пришло и куда оно направлено. Предварительно заданная рамка ограничивает область пространства чувствительности теста. Интерпретация теста учитывает символику прямоугольного пространства, которая была разработана Максом Пульвером, Гертцем Артусом, Михаэлем Грюнвальдом и др. Основные положения этих разработок даны в книге К. Коха [2]. «Показатели психографического теста в совокупности дают характеристику мотивации по силе, устойчивости, уровню побуждения, содержанию, генезису (когда возник мотив, имеется ли тенденция к угасанию или развитию его), структурности (какие мотивы являются доминирующими, устойчивыми), качеству (созерцательные, связанные с активными действиями, осознанные или неосознанные и т. д.)» [3].

Валидность и надежность теста подтверждена различными исследованиями, этот тест рекомендован для диагностики мотивации, стремлений и намерений в научных и практических целях [4]. При интерпретации результатов теста через центр прямоугольника провидится ось координат (X, Y), которая делит его на четыре зоны с координатами $[+X, +Y]$, $[-X, +Y]$, $[+X, -Y]$, $[-X, -Y]$ соответственно. Каждая из этих зон прямоугольника обозначает различные характеристики мотивации. На рисунке 1 представлены характеристики мотивации на поле чувствительности. Далее в прямоугольнике проводится диагональ из левого нижнего угла в правый верхний угол, которая в психологической практике называется «линией жизни». Мотивацию характеризуют следующие показатели [4]:

- угол между линией жизни и вектором стремления;
- направление вектора мотивации;
- координаты точки мотивации;
- расстояние от нижней линии рамки до точки мотивации;
- расстояние от начала координат до точки мотивации.

Рис. 1. Характеристики мотивации на поле чувствительности

Типичные примеры психографических тестов представлены на рисунке 2. К сожалению, обработка и интерпретация результатов исследования с применением Психографического теста В.Г. Леонтьева несколько трудоемки и затратны по времени, что делает их малораспространенными среди ученых и недоступными для применения практикующими психологами.

Для решения задачи автоматизации измерения параметров психографического теста в ИПФ РАН был разработан программный комплекс PsyGraph, который базируется на алгоритмах компьютерного зрения и машинного обучения. Был разработан следующий алгоритм автоматического измерения параметров психографического теста, который включает в себя семь основных шагов:

- Шаг 1. Определение рамки.
- Шаг 2. Определение областей интереса.
- Шаг 3. Определение граничных точек.
- Шаг 4. Определение точки мотивации.
- Шаг 5. Определение конечной точки вектора мотивации.
- Шаг 6. Построение системы координат.
- Шаг 7. Вычисление параметров теста.

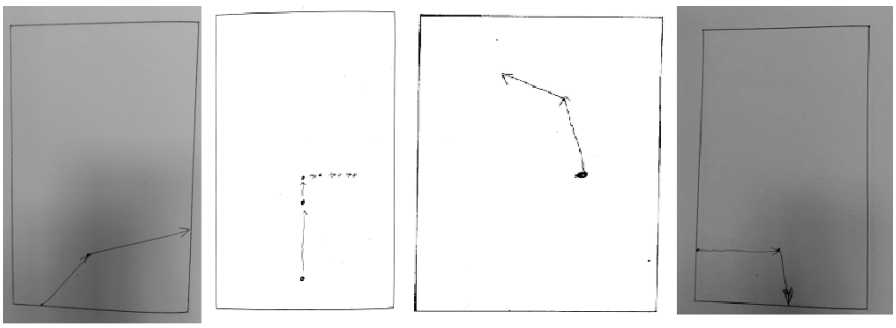


Рис. 2. Типичные примеры психографических тестов

Определение рамки. Описанием рамки является 4 угловых точки *ABCD*, как показано на рисунке 1. Для поиска этих угловых точек и, соответственно, для определения рамки используется алгоритм поиска фрагментов изображения, основанный на нейроноподобных детекторах заданных объектов, который описан в [5]. Используется 4 нейроноподобных детектора для каждого угла рамки. Поиск ведется по фрагменту изображения, включающему искомую точку.

Определение областей интереса. Для определения областей интереса все изображение разбивается на прямоугольные фрагменты размером 16×16 пикселей, в каждом из которых вычисляется дисперсия данного фрагмента. Если разница между дисперсией всего изображения и дисперсией анализируемого фрагмента превышает заданный порог, то данная область рассматривается как область интереса.

Определение граничных точек. Для определения граничных точек используется алгоритм поиска угловых точек методом Харриса [6] с последующим совмещением полученных точек с найденными областями интереса.

Определение точки мотивации. Точка мотивации находится как точка центров областей интереса, наиболее удаленная от граничных точек. В случае если все области интереса лежат на одной линии, то точкой мотивации считается середина отрезка, соединяющего найденные граничные точки.

Определение конечной точки вектора мотивации (точки стремления). Для определения конечной точки вектора мотивации используется нейроноподобный детектор изображения стрелки, выполненный как детектор атрибутов области интереса, построение которого описано в статье [7].

Построение системы координат. Построение системы координат включает в себя поиск всех геометрических объектов, необходимых для вычисления параметров теста. В набор ключевых геометрических объектов входят:

- точка начала координат,
- «линия жизни»,
- точка мотивации,
- вектор мотивации (вектор, соединяющий точку мотивации и точку стремления).

Для построения системы координат используются данные, полученные в результате поиска рамки. Система координат определяется началом координат как точкой пересечения прямых *AC* и *BD* и «линией жизни», которая задается прямой *AC*.

Вычисление параметров теста. Для вычисления параметров теста [4] используются простые методы вычислительной геометрии, включающие поиск расстояний между двумя точками, расстояния от точки до прямой и угла между векторами.

Основные этапы выполнения алгоритма автоматического вычисления параметров психографического теста приведены на рисунке 3.

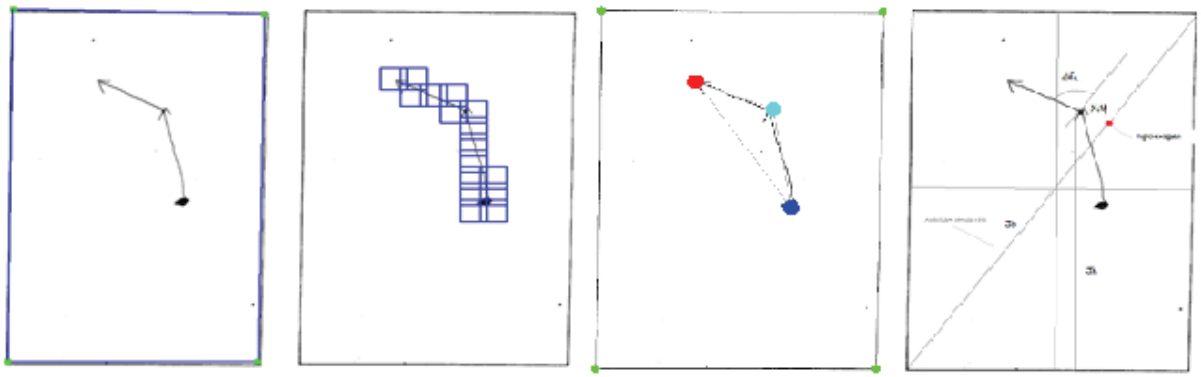


Рис. 3. Этапы выполнения алгоритма поиска параметров психографического теста. Слева направо: определение рамки, определение областей интереса, определение граничных точек, точки мотивации (голубая) и конечной точки вектора мотивации (красная), построение системы координат и вычисление параметров теста

Выводы. Полученный в результате алгоритм пригоден для автоматической обработки больших массивов графической информации, которые содержат данные психографических тестов Леонтьева и может быть использован не только научными работниками, но и практикующими психологами для выполнения исследований характеристик мотивации по силе, устойчивости, уровню побуждения, содержанию, генезису, структурности и качеству.

Литература

1. *Леонтьев В.Г.* Мотивация и психологические механизмы ее формирования. Новосибирск, 2002. 264 с.

2. *Koch K.* Der Baumtest. Bern ; Stuttgart ; Toronto : Verlag H. Huber, 1986.

3. *Бадмаева Н.Ц.* Влияние мотивационного фактора на развитие умственных способностей : Монография. Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2004. 280 с. ISBN 5-89230-193-1.

4. *Маркелова Т.В.* Роль мотивационного критерия в оценке психологической готовности к военно-профессиональной деятельности и его изучение с помощью психографического теста В.Г. Леонтьева // Сибирский педагогический журнал. 2007. С. 176–183.

5. *Беллюстин Н.С., Калафати Ю.Д., Ковальчук А.В., Тельных А.А., Шемагина О.В., Яхно В.Г.* Системы обнаружения, сопровождения и кластеризации объектов на основе нейроноподобного кодирования // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8, № 2. С. 29–34.

6. *Harris C., Stephens M.* A combined corner and edge detector // Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. 1988. P. 147–151.

7. *Bellustin N., Kalafati Y., Kovalchuck A., Telnykh A., Shemagina O., Sharma P., Vaish A., Verma S., Yakhno V.* Instant Human Face Attributes Recognition System // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). 2011. Special Issue on Artificial Intelligence. P. 112–120.

Нелинейные процессы в электрической активности структур лимбической системы морской свинки в ответ на ритмическую фотостимуляцию

А.Т. Бондарь[1], Л.В. Шубина[2]

[1] Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Московская область
[2] Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино, Московская область

Разум людей устроен так,
что его устройство
соответствует устройству мира
Роман Уфимцев
(http://www.cognitivist.ru/er/kernel/manifest.xml)

Перефразируем эпиграф следующим образом: структура мира формирует механизмы функционирования мозга, тем самым определяет структуру сознания. Одним из важнейших свойств физического мира является его нелинейность. «И материя, и ее эволюция описываются нелинейными соотношениями, которые отражают нетривиальные процессы в движущейся материи. У автора появились веские основания для вывода о том, что *нелинейность – главное свойство мира.* Именно она управляет эволюцией мира» [1]. В литературе накопилось большое количество работ, демонстрирующих нелинейный характер функционирования зрительной системы на всех ее уровнях [2, 3, 4] при восприятии периодических сигналов. В то же время в физиологии ее наличие только констатируется, причем в основном только в работах, посвященных сенсорным системам. Кроме того, не обсуждается вопрос, является ли нелинейность следствием пассивного искажения сигнала в силу наличия в системе нелинейных элементов, или же она носит активный функциональный характер. Большинство литературных данных посвящено исследованиям реакций структур зрительной системы в ответ на внешнюю ритмическую фотостимуляцию, в то же время мало что известно о процессах, происходящих в других структурах мозга, в частности в лимбической системе, играющей важную роль в обработке и хранении информации. В связи с этим целью настоящей работы стало исследование нелинейных процессов в электрической активности структур лимбической системы морской свинки при восприятии гармонических световых сигналов. Схема эксперимента показана на рис. 1.

На глаза животных, находящихся в специально сконструированной камере, при помощи красных светодиодов подавался синусоидальный световой сигнал частотой 10 Гц. Одновременно происходила регистрация локальных полевых потенциалов (ЛПП) медиальной септальной области (МС), гиппокампа (Гип), энторинальной коры (Энт) и амигдалы (БА) животных.

Полученные результаты показывают, что вызванные реакции в ЛПП лимбической системы в ответ на синусоидальную фотостимуляцию имеет крайне выраженный нелинейный характер, проявляющийся в наличии в спектрах большого количества пиков, кратных частоте стимуляции (рис. 2).

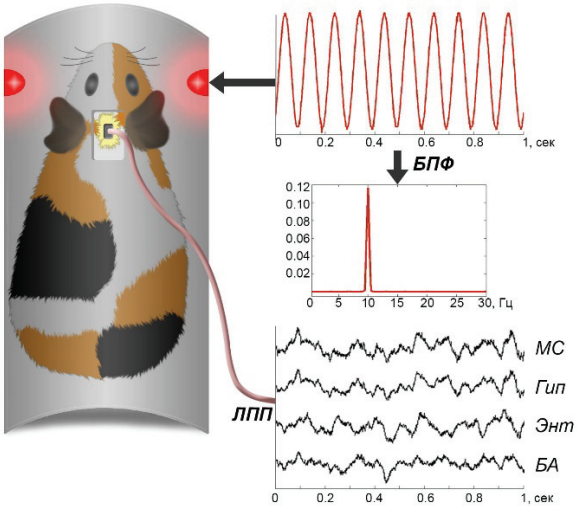


Рис. 1. Схема эксперимента

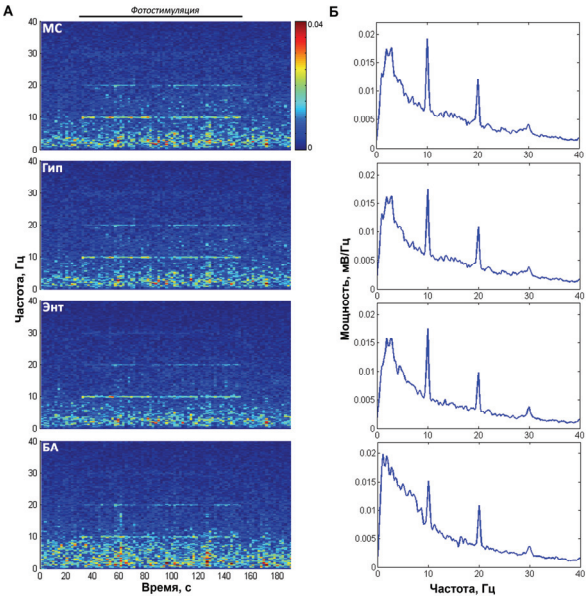


Рис. 2. Динамика спектров (*А*) и суммарные спектры (*Б*) ЛПП в медиальной септальной области (МС), гиппокампе (Гип), энторинальной коре (Энт) и амигдале (БА) при фотостимуляции морской свинки частотой 10 Гц. Время фотостимуляции отмечено горизонтальной линией сверху спектрограмм (*А*).

Коэффициент гармонических искажений (КГИ), принятый для количественной оценки не-

линейности и рассчитанный по формуле (1), может принимать десятки и даже сотни процентов.

$$\text{КГИ} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + ... + U_n^2}}{U_1} \cdot 100, \qquad (1)$$

где U_n – амплитуда n-й гармоники и $n = 1$ является фундаментальной частотой.

Данная нелинейность не является константной, а представляет собой колебательный процесс, обусловленный не зависимой друг от друга динамикой амплитуд всех наблюдаемых гармоник (рис. 3).

Эта динамика находит отражение в постоянно изменяющейся форме вызванного суммарного сигнала ЛПП. Этот факт заставляет пересмотреть взгляд на вызванную активность в ответ на периодическую стимуляцию как нечто стабильное по форме [5], позволившее ввести понятие стабильных зрительных вызванных потенциалов, или “steady state visually evoked potentials (SSVEP)” в англоязычной литературе.

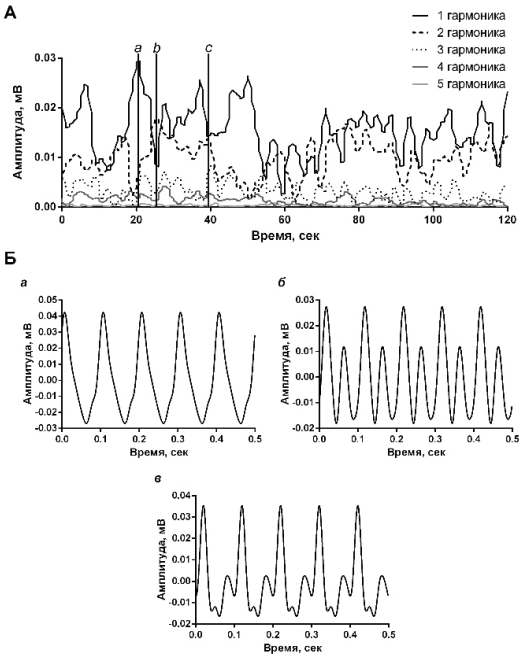


Рис. 3. Динамика амплитуд 5 наиболее выраженных гармоник (*А*) и форма восстановленного на их основе суммарного индуцированного фотостимуляцией сигнала ЛПП (*Б*) в гиппокампе морской свинки в разные моменты времени (отмечены курсорами *а*, *б*, *в*)

Анализ показал, что не только амплитуды гармоник обладают независимой динамикой в процессе фотостимуляции, но и их фазы, причем их динамика подчиняется разным закономерностям (рис. 4).

Прецессия фазы 1-й гармоники относительно фазы стимула нелинейна, в то время как динамика 2-й гармоники подчиняется линейному закону. Изменение фазовых соотношений стимула и вызванных реакций во времени, к тому же подчиняющееся определенным закономерностям, может указывать на то, что фаза процесса является важным функциональным параметром.

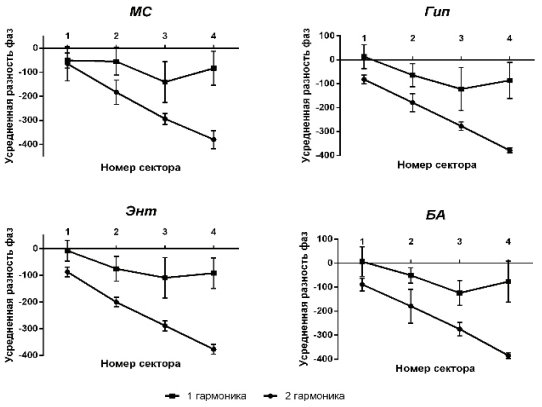


Рис. 4. Фазовая прецессия 1-й и 2-й гармоник относительно фазы стимула в медиальной септальной области (МС), гиппокампе (Гип), энторинальной коре (Энт) и амигдале (БА). Данные представлены как среднее значение плюс-минус стандартное отклонение

Литературные данные также говорят о том, что фазовые соотношения в осцилляторных системах могут играть большую роль в функционировании локальных нервных цепей, а также в организации функции памяти [6]. Изменение фазы между двумя периодическими процессами при их неизменной частоте возможно, на наш взгляд, только в одном случае – если они отражают пространственные волновые процессы, имеющие одну и ту же длину волны, но распространяющиеся в среде с разной скоростью. В этом случае, при неизменности фаз каждого процесса в отдельности, разность фаз между ними в определенной точке пространства (например, в районе электрода) будет величиной непостоянной и изменяться во времени в зависимости от соотношения скоростей распространения волновых процессов.

Пространственно-волновые процессы возможны только в слоистых структурах, например в коре и гиппокампе, однако полученные нами результаты показывают аналогичную динамику разности фаз и в ядерных медиальной септальной области и амигдале. Это противоречие можно объяснить простым механизмом – в слоистой структуре существует локус (аналогичный нашему электроду), через который мигрируют волны, которые, как уже говорилось выше, могут передвигаться с разной скоростью, тем самым изменяя между ними разность фаз. Их значения в данной точке по существующим связям могут транслироваться в ядерные структуры, где будут воспроизводиться в виде осцилляторных процессов, имеющих соответствующую разность фаз. Таким образом, пространственно организованный процесс преобразуется в процесс, организованный во времени, т. е. осуществляется пространственно-временная интеграция. Возможна и обратная операция – осцилляции в ядерных структурах преобразуются в волновые в слоистых. В результате лимбическая система имеет возможность оперировать как пространственно, так и временно-организованными связанными процессами.

Подводя итог полученным результатам, можно утверждать, что паттерн вызванного ЛПП представляет собой суммацию множества гармонических процессов. Эти гармоники не зависимы друг от друга как по амплитуде так и по фазе, что свидетельствует об их различном функциональном назначении. Нервная система оперирует этими гармониками независимо друг от друга, что приводит к постоянной эволюции формы (паттерна) вызванного ЛПП. Функциональное назначение этих операций остается неясным и требует дальнейших исследований. В целом нелинейность в нервной системе следует рассматривать не как простое искажение сигнала в силу наличия нелинейных элементов, а как *механизм формирования независимых гармонических процессов и операций с ними с целью реализации функций мозга.*

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №15-04-05463, 16-34-00457, 17-44-500312.

Литература

1. *Черногор Л.Ф.* Нелинейность мира в явлениях природы. URL: http://www.science-techno.ru/nt/article/nelineinost-mira-v-yavleniyakh-prirody.

2. *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. P. 395–409.

3. *Srinivasan R., Bibi F.A., Nunez P.L.* Steady-state visual evoked potentials: distributed local sources and wave-like dynamics are sensitive to flicker frequency // Brain Topogr. 2006. V. 18. P. 167–187.

4. *Gowrisankaran S., Alexander K.R.* Stimulus chromatic properties affect period doubling in the human cone flicker ERG // Doc. Ophthalmol. 2012. V. 125, № 1. P. 21–29.

5. *Regan D.* Human Brain Electrophysiology: Evoked Potentials and Evoked Magnetic Fields. N. Y. : Elsevier Science Publ., 1989. 672 p.

6. *Buzsáki G., Moser E.I.* Memory, navigation and theta rhythm in the hippocampal-entorhinal system // Nat. Neurosci. 2013. V. 16, № 2. P. 130–138.

Новый анализ взаимосвязи понятий информации и знаний на междисциплинарной основе

Г.Б. Бронфельд

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
stolem1985@gmail.com

Все большую остроту в последние десятилетия приобретает проблематика работы со знаниями и информацией. У Р. Шенка есть такая фраза: «Не существует универсального способа классификации Вселенной» [1]. Но людям приходится в своей практической деятельности как-то определяться в окружающем мире. Вначале появилась речь, умение фиксировать и передавать образы, потом появилась письменность, тексты на разных носителях. И лишь потом появились книги [2]. Возникла наука как объективная форма отражения окружающей человека действительности. Постепенно появились термины «информация» и «знания», которые при жестком взаимодействии между собой оказались задействованы в процессе сатурации («информационного взрыва»), потрясшего человечество по второй половине XX века и только нарастающего до сих пор. Поскольку понятия «знания» и «информация» рассматриваются и используются в совершенно разных научно-технических направлениях и гуманитарной сфере, приходится вести рассмотрение на междисциплинарной основе.

Непосредственно проблематику «знаний» ученые изучают несколько тысяч лет, на проблематику «информации» всерьез стали обращать внимание фактически лишь с начала XX века. При этом сложилась ситуация, когда часть ученых занималась и обращала внимание только на «знания», например [3], другая только на «информацию», например [4–6]. То, что они жестко взаимосвязаны, мало кто фактически понимал и подчеркивал [7–9]. Постепенно появилось очень много различных определений «информации» и «знаний», в частности определений «информации» насчитали более 500 [10].

Длительное время проблематикой собственно «знаний» занимались философы [3]. Во второй половине XX века к этому активно подключились специалисты по ИТ-технологиям, в частности по направлению «искусственный интеллект» (ИИ) [11, 12]. Чтобы активно работать с «информацией» и «знаниями», они активно применяли различные математические модели, особенно в направлении ИИ, и стали все дальше уходить от представлений философов. Это вызвало у них большое раздражение [3,13]. При этом часть столкновений происходила вокруг неявных знаний [3, 14].

Большое значение в XX веке имела появившаяся шенноновская теория «информации» [15, 16].

Последние несколько десятилетий активно стала обсуждаться *атрибутивная точка зрения* на «информацию» как составляющую физического мира. Ее поддерживает часть философов, физиков и других [17–20]. На этом фоне рядом зарубежных ученых, в частности Л. Флориди, Лю Ганом, стало развиваться новое направление – «*философия информации*», что заинтересовало ряд российских философов [6, 21–24]. Однако такой подход стал резко противоречить всему развитию философии за несколько тысяч лет, когда изучали проблематику «знаний».

В 80-х годах получило распространение новое *четырехуровневое представление* «*знаний*» [7–9]. До того широко и успешно применялось (и до сих пор применяется) *двухуровневое представление* [11, 12, 25]. В основе находятся «данные (понятия)», т. е. отдельные факты, характеризующие объекты, процессы и явления предметной области. Тогда «знания» – это хорошо структурированные данные, или данные о данных, или метаданные. Есть традиционные представления «знаний», использующих такую основу, в частности семантические сети и фреймы.

В четырехуровневую структуру «знаний» входят – «данные (понятия)», «информация» (в узком смысле), собственно «знания» и «мудрость» [7–9, 26, 27]. «Данные (понятия)» трактуются как самые простые элементы знания, их цель неясна и неоднозначна. «Информации» свойственна более высокая конкретность цели, объединение сведений или данных. Как только данные преобразованы в информацию, вернуть их в исходное состояние трудно. Собственно «знания» охватывают реальный процесс обработки входных данных, включая координацию действий для достижения результатов, целей или получения продуктов. При этом «мудрость» соотносится с объяснимостью что, зачем и почему.

Причем были предложены и другие варианты структуры «знания» – от трехуровневого до шестиуровневого [28–30].

Хорошо известно, что для двухуровневой структуры «знаний» широко, давно и успешно применяются графовые и иные математические методы представления и обработки. А вот для четырехуровневой структуры «знаний» в этом направлении почему-то всерьез ничего сделано не было за почти 30-летнюю историю обсуждения данного подхода, и весьма активного.

Нами был предложен (опубликован в 2012 г. [29] и дополнен анализом в 2016 г. [31, 32]) такой вариант графового представления четырехуровневой структуры «знаний», что позволило общей ситуации с информацией и знаниями быстро проясниться. «Данные (понятия)» представлены в виде множества вершин *V*. «Информацию» (в уз-

ком смысле) можно представить в виде несвязного графа $G(V, E)$, где отдельные вершины связаны между собой. Тогда «знания» можно представить в виде множества маршрутов S на графе, где базовыми являются вершины данных (понятий). При этом «мудрость» M_{sk} – это множество интерпретаций, поясняющих полезность k-го маршрута S_k.

Такой подход, с одной стороны, позволяет понять, что именно четырехуровневое представление на текущий момент наиболее конструктивно для работы со знаниями и информацией, а с другой – предоставляет возможность начать объективно разбираться в совершенно разных подходах к информации, обоснование которых до того выстраивалось почти только на вербальной основе. И это было продемонстрировано независимо от нас в работах О.В. Зеркаля [27].

И тут мы сталкиваемся с тем, что количество разных подходящих определений «информации» начинает быстро падать – некоторые оказываются неправильными, некоторые дублируют семантический смысл. Такой подход позволяет перейти от 500 разных определений к шести небольшим группам определений.

Одна мощная группа придерживается атрибутивной точки зрения [5, 17–19], считая, «что информация предполагается неотъемлемым свойством (атрибутом) материи и поэтому она может проявлять себя во всех объектах, процессах и явлениях как живой, так и неживой природы» [15]. Назовем это определение – «*информацией*-1». Сразу отметим (причем дело не в том, что это противоречит Н. Винеру): данный вопрос весьма серьезен и его невозможно решить без серьезных теоретических моделей и масштабных экспериментов, причем в первую очередь методами физики на основе математических методов. На наш взгляд, люди этими уточнениями и исследованиями еще миллионы лет будут заниматься, возможно, даже с переменными выводами. И пока это оставим как есть, тут пока ни философия, ни лингвистика, ни направление ИИ не слишком помогут.

«*Информация*-2» пусть будет результат действий/коммуникаций высокоорганизованных живых субъектов или результат действия организованных технических субъектов [15, 20]. Шенноновский подход на основе статистической оценки количества информации, к которому причастен и Н. Винер, назовем «*информация*-3» [15, 16].

Информацию, которая получена на основе связи данных, назовем «*информация*-4». Она соответствует «информации» (в узком смысле), используемой в четырехуровневой структуре знаний.

Приведем формулировку из словаря под руководством академика А.П. Ершова: «Данные в информатике – факты или идеи, выраженные средствами формальной системы, обеспечивающей возможности их хранения, обработки или передачи. Такую формальную систему называют языком представления данных; синтаксис этого языка – способом представления информации; его семантику или прагматику – информацией» [33]. Здесь отчетливо подчеркнута связка «данные» – «информация», в том числе по уровням иерархии.

Близкие формулировки фигурируют уже вполне давно и у совершенно разных уважаемых специалистов, например у Дж. Мартина [34] и Л. Флориди [6].

Приведем лишь одну из множества противоположных, ошибочных, точек зрения: «…понятие информации заменяется на менее ограничительное понятие «данные». Данные представляют собой набор утверждений, фактов и/или цифр, лексически и синтаксически взаимосвязанных между собой» [35].

Особое место занимает одно юридическое определение термина «информация» [36, 37], назовем его «*информация*-5». В соответствии с ним «информация – это «сведения (сообщения, данные) независимо от формы их представления» [36]. В [37] отмечается: эта трактовка имеет больше значения, чем просто юридическое (ранее был иной вариант закона с близкой формулировкой) «понятие «информации» может быть определено как общий объем накопленных человечеством знаний». Будем также называть «*информацию*-5» «информацией в широком смысле». Такая трактовка получается, если все виды компонент знаний из четырехуровневой структуры «знаний» мы начнем накладывать друг на друга в графовом представлении на основе правил дискретной математики – получим «*информацию*-5».

Теперь философскую точку зрения на информацию назовем «*информацией*-6» [21–24].

Атрибутивная точка зрения («*информация*-1») и философская («*информация*-6») занимают особое место, и с ними разбираться будут еще долго, возможно тысячи и миллионы лет, постепенно относя найденные новые знания в этом направлении в более ясные трактовки информации и знаний.

Теперь попробуем разобрать ситуацию с оставшимися ключевыми определениями «*информации*-2», «*информации*-3», «*информации*-4», «*информации*-5» и выявить некоторые онтологические связи между ними и четырехуровневой структурой знаний.

Уже отмечалось, что данные (понятия) – соответствуют вершинам некоего графа G. Информация (в узком смысле) – это граф G_1, как минимум, с одним ребром (или набор разных графов) с вершинами из G ($G_1 \subset G$). Тогда знания (в узком смысле) – это маршрут (набор маршрутов) в графе G, ведущий к некоему результату (вершине / множеству вершин). Теперь мудрость – это разъяснение (интерпретация, почему выбран именно данный маршрут для конкретного знания из бесконечного множества) – также представляет собой маршруты, но другие, чем для знаний. После этого делаем следующее: объединяем эти графы на основе методов дискретной математики и получаем граф G высокой сложности. Как это можно сделать не только математически, но и практически, на основе *технологии прямого наложения знаний*

в рамках методов ИИ и компьютерной лингвистики, описывается в [30, 38–40]. Но граф G и есть графовое представление «*информации-5*» (информации в широком смысле). Вершины в этом графе – однозначно элементы данных – подробно описаны у Дж. Мартина [34], «*информация*-4» (информация в узком смысле) – это множество подграфов G_1 в графе G ($G_1 \subset G$).

Теперь насчет статистического подхода Шеннона и подхода, связанного с G. Этот способ подходит для процесса получения вершин, а также анализа ребер и маршрутов в графе G. Тут нет никаких проблем, а семантика связана со связями и структурами на уровне знаний и мудрости и никакого отношения к собственно подходу Шеннона не имеет.

И, наконец, последнее понятие – «*информация*-2». Все вершины графа G где-то возникают или кому-то нужны, может быть, и миллион лет назад (возникло) или через миллион лет потребуются (как результат). Но и связи между вершинами могут и существовать, но нас абсолютно на текущий момент не интересовать, или они могут быть ложны (или недостаточно точны). Но они все равно связаны с какими-то реальными объектами (вершинами графа G) и описываются или языковыми средствами, или средствами науки, например цифрами, графиками, образами и т. п.

Таким образом, проблематика «*информации*-2» всего лишь объяснение того, что может происходить или происходит с элементами «*информации*-4», «*информации*-5». Конечно, люди имеют дело с конечным и микроскопическим графом $G \subset G^*$. Граф G, конечно, для сегодня живущих людей кажется «бесконечным» и неизмеримо превышающим их текущие возможности, в том числе технические. Но только граф G^*, который касается всех десятков миллиардов лет жизни Вселенной и десятков миллиардов световых лет, расстояний и информации о них, еще более неизмеримо масштабен по сравнению с информацией, связанной с графом G. Естественно, знания и мудрость, доступные человечеству, даже в совокупности, которую еще когда-то, через долгие десятилетия, предстоит достичь (по состоянию хотя бы на текущий момент), являются еще более микроскопическим подграфом G^*. И это с учетом всех мыслимых и немыслимых неявных знаний [14] всех жителей Земли, живущих сейчас.

На наш взгляд, можно констатировать:

1) существует *атрибутивная точка зрения* на проблематику «информации», которую имеет смысл развивать;

2) существует развивающийся философский взгляд в рамках «*философии информации*», который имеет право на развитие, как минимум, пока неясна ситуация с атрибутивной точкой зрения;

3) новый структурный подход (четырехуровневый) на знания резко меняет ситуацию с разношерстными взглядами на проблематику информации, а тем более с учетом попытки математической трактовки новой структуры знаний. Многое упрощается, что-то отчетливо стыкуется между собой, что-то становится просто вспомогательным, что-то становится лишь иным вербальным изложением того же самого, ну а часть, как ложные или ошибочные трактовки, просто должна отпасть.

Литература

1. *Schank R.C.* Conceptual Information Processing. N. Y. : Elsevier Sciece Inc., 1975. 379 p.

2. *Немировский Е.Л.* Большая книга о книге. М. : Время, 2010. 1088 с.

3. *Алексеева И.Ю.* Человеческое знание и его компьютерный образ. М. : Ин-т философии РАН, 1993. 215 с.

4. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М. : Едиториал УРСС, 2009. 304 с.

5. *Колин К.К.* Философские проблемы информатики. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 264 с.

6. *Floridi L.* Semantic Conceptions of Information. First published Wed. Oct. 5, 2005; substantive revision Wed. Jan. 7, 2015. URL: http://plato.stanford.edu/entries/information-semantic.

7. *Cleveland H.* Information as a Resource // The Futurist. 1982. December. P. 34–39.

8. *Zeleny M.* Management Support Systems: Towards Integrated Knowledge Management // Human Systems Management. 1987. V. 7 (1). P. 59–70.

9. *Ackoff R.* From Data to Wisdom // Journal of Applied Systems Analysis.1989. № 16. P. 3–9.

10. *Бекман И.Н.* Информатика. Москва ; Рим, 2009. URL: http://profbeckman.narod.ru/InformLekc.htm.

11. *Newell A.* The knowledge level // Artificial Intelligence. 1982. V. 18, № 1. P. 87–127.

12. Искусственный интеллект : в 3 кн. Кн. 2 : Модели и методы : справочник / под ред. Д.А. Поспелова. М. : Радио и связь, 1990. 304 с.

13. *Bloomfield B.* Expert systems and human knowledge : A view from the sociology // AI@So-ciety. 1988. V. 2, № 1. P. 15–29.

14. *Полани М.* Личностное знание. На пути к посткритической философии. М. : Прогресс, 1985. 343 с.

15. *Винер Н.* Кибернетика или управление и связь в животном и машине. М. : Советское радио, 1968. 328 с.

16. *Коган И.М.* Прикладная теория информации. М. : Радио и связь, 1981. 216 с.

17. *Колин К.К.* Философия информации и феномен информации : доклад на 10-м заседании семинара «Методологические проблемы наук об информации» (Москва, ИНИОН РАН, 7 февраля 2013 г.). URL: http://www.inion.ru/files/File/MPNI_10_Kolin_text.pdf.

18. *Кадомцев Б.Б.* Динамика и информация. М. : Редакция журнала «Успехи физических наук», 1999. 400 с.

19. *Гуревич И.М.* Оценка информационных характеристик Вселенной // Информационные технологии. 2008. № 12. Приложение. С. 1–32.

20. *Фридланд А.Я.* О сущности информации: два подхода // Информационные технологии. 2005. № 5. С. 75–85.

21. *Floridi L.* The Philosophy of Information. Oxford : University Press, 2011. 426 p.

22. *Хлебников Г.В.* Философии информации Лучано Флориди // Метафизика. 2013. № 4 (10). С. 35–48.

23. *Лю Ган.* Философия информации и основы будущей китайской философии науки и техники // Вопросы философии. 2007. № 5. С. 45–57.

24. *Черный Ю.Ю.* Философия (метафизика) информации: взгляд из Китая (по материалам статьи Лю Гана

«Философия информации и основы будущей китайской философии науки и техники) // Метафизика. 2013. № 4 (10). С. 85–90.

25. *Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. СПб. : Питер, 2001. 384 с.

26. Информационные технологии в бизнесе / под ред. М. Желены. СПб. : Питер, 2002. 1120 с.

27. *Зеркаль О.В.* О содержании и соотношении «данные», «информация» и «знания» в инженерной геологии // Инженерная геология. 2014. № 6. С. 18–31.

28. *Carpenter S.A.* A Primer: Enterprise Wisdom Management and the Flow of Understanding. 2008. URL: http://www.cognitivecybernetics.com/PrimerFoU.html.

29. *Бронфельд Г.Б.* Некоторые возможности формального представления структуры знаний // Труды Нижегор. гос. тех. ун-та им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 4(97). С. 91–100.

30. *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.

31. *Бронфельд Г.Б.* Анализ изменений понятия «знание» с точки зрения современных структурных представлений // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 4. С. 48–56.

32. *Бронфельд Г.Б.* Анализ содержательной трактовки понятия «информация» с точки зрения современных структурных представлений // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 11. С. 56–64.

33. Математический энциклопедический словарь. М. : Советская энциклопедия, 1988. 847 с.

34. *Мартин Дж.* Организация баз данных в вычислительных системах. М. : Мир, 1980. 564 с.

35. *Мишенин А.И.* Теория экономических информационных систем. М. : Финансы и статистика, 2008. 240 с.

36. Об информации, информационных технологиях и о защите информации : Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ. URL: http://base.garant.ru/12148555/.

37. *Веревченко А.Л.* [*и др.*]. Информационные ресурсы для принятия решений. М. : Академический проект, 2002. 560 с.

38. *Бронфельд Г.Б.* Прямое наложение знаний на основе моделей специального вида // Системы управления и информационные технологии. 2011. № 4.1(46). С. 124–128.

39. Пат. на изобретение, № 2440610, Российская Федерация, МПК G06 N 5/00. Система для работы с интеллектуальной электронной книгой – элингой. Заявитель и патентообладатель Бронфельд Г.Б., № 20101275501/08 ; заявка 21.06.2010 ; опубл. 20.01.12. Бюл. № 2.

40. *Бронфельд Г.Б.* Основы искусственного интеллекта. Н. Новгород : НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. 253 с.

Сознание – логически непротиворечивая прогностическая модель реальности

Е.Е. Витяев

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

В работах П.К. Анохина показано, что принцип опережающего отражения действительности является основой всего живого. Опережающее отражение действительности основано на причинности внешнего мира. В данной работе показывается, что отражение мозгом причинности внешнего мира может быть организовано в логически непротиворечивую прогностическую модель реальности, которая непрерывно во времени и в пространстве проверяет себя на адекватность этой реальности. Эта модель и есть сознание. При этом сознание отражает не все причинные связи, а только те, которые связаны с достижением организмом определенных целей (удовлетворением потребностей). В соответствии с информационной теорией эмоций П.В. Симонова [11, 12], субъективные эмоциональные ощущения возникают только тогда, когда есть вероятностный прогноз достижения цели(ей) и неудовлетворенная потребность, соответствующая этим целям. Поэтому сознание всегда окрашено некоторыми субъективными ощущениями (qualia), которые отражают достигаемые организмом цели вместе с оценкой вероятности достижения этих целей. При этом автоматизмы, не содержащие вероятностные прогнозы достижения целей (промежуточных целей), уходят из сознания.

Хороший пример целевой направленности сознания приводит У. Найсером: «Мы записали на видеомагнитофон две игры (например, футбол и хоккей – *Е.В.*), а затем с помощью зеркала осуществили полное визуальное наложение двух передач – как если бы на телевизионном экране одновременно демонстрировались два канала... Испытуемых просили наблюдать за одной игрой и игнорировать другую, нажимая на ключ при каждом целевом событии (например, при каждом ударе по мячу, шайбе – *Е.В.*) в наблюдаемой игре. <...> При темпе 40 целевых событий в минуту было одинаково легко следить за игрой независимо от того, демонстрировалась она вместе с другой или отдельно. Количество ошибок составляло примерно 3 %... Естественность этой задачи и отсутствие интерференции со стороны второго эпизода просто удивительны. Испытуемый ***не видит*** (выделение наше – *Е.В.*) иррелевантную игру... Циклическая модель восприятия позволяет легко объяснить эти результаты» [10. С. 103–105].

Предлагаемая нами в работе оригинальная формализация причинных связей и циклических причинных связей включает в себя циклическую модель восприятия [4, 5]. Эта циклическая модель непрерывно во времени и в пространстве проверяет себя на адекватность реальности, как это описано в книге С.Д. Смирнова «Психология образа»: «Все это позволяет нарисовать следующую картину хода познавательной деятельности на уровне восприятия. Индивид всегда имеет некоторый образ или модель окружения, которая непрерывна во времени и пространстве и носит прогностический характер, т. е. в ней экстраполируются и воспроизводятся на языке чувственных модальностей ожидаемые результаты воздействия источника стимула на наши органы чувств» [13].

Сознание, как логически непротиворечивая прогностическая модель реальности, не только непрерывно во времени и пространстве прогнозирует, какие стимулы будут восприняты в следующий момент, но и непрерывно проверяет правильность этих прогнозов. Совпадение их с реально поступающими стимулами создает ощущение присутствия во внешнем мире.

В нашей формализации причинные связи обнаруживаются нейронами, формальная модель которых [24] удовлетворяет правилу Хебба [16]. Циклические причинные связи обнаруживаются клеточными ансамблями, которые, как мы покажем, обнаруживают «естественную» классификацию объектов внешнего мира [2] и обладают свойством интегрированной информации по G. Tononi [18].

Важным свойством сознания, которое проявляется не во всех структурах мозга, как это показано G. Tononi [18], является его интеграционный характер. Наиболее емкой фразой, характеризующей его, является: «различия, делающие различие» ("differences that make a difference") [18]. Она означает, что совокупность различий приводит к качественному отличию, или, иначе, качественно отличающиеся объекты различны по целой совокупности различных свойств. Чтобы уловить это свойство сознания, G. Tononi вводит понятие интегрированной информации, когда информация от системы причинных связей свойств объекта превосходит информацию от совокупности свойств самих по себе. Тогда объекты различаются не по отдельным свойствам, а по совокупности (паттерну) различающихся свойств. В нашей формализации циклические причинные связи автоматически формируют паттерны различающихся свойств, которые причинно взаимосвязаны. В нашем эксперименте на закодированных цифрах [4, 5] рассматриваются все возможные причинные связи между различными признаками цифр, которые верны для всех цифр, но при этом выделение и идентификация отдельных цифр происходит только по паттернам свойств цифр, циклически взаимно предсказывающих друг друга причинными свя-

зями. Более того, сами паттерны свойств в нашей формализации автоматически формируются причинными связями как циклически взаимно предсказывающийся набор свойств, формирующий неподвижную точку. Не все области мозга способны формировать богатые циклические причинные связи для идентификации объектов внешнего мира, а также для непрерывной во времени и пространстве проверки правильности сделанных предсказаний, что создает ощущение реального существования этих объектов во внешнем мире.

Свойство сознания по восприятию объектов паттернами свойств, в которых «различия делают различие», на самом деле опирается на высокую коррелированность свойств «естественных» объектов внешнего мира. Это свойство подтверждено естествоиспытателями, которые строили «естественные» классификации, а также исследованиями по формированию «естественных» понятий в когнитивных науках. Для формализации «естественных» понятий B. Rehder [20, 21] выдвинул теорию причинных моделей, в которой отношение объекта к категории основывается уже не на множестве признаков и близости по признакам, а на основании сходства порождающего причинного механизма: «объект классифицируется как член некоторой категории в той степени, в которой его свойства, вероятно, были сгенерированы причинными законами данной категории» [20, 21].

Сознание, как и «естественная» классификация объектов внешнего мира, иерархична. Как говорит Дж. Гибсон, внешний мир имеет свойство «встроенности»: «…ущелья встроены в горы, деревья встроены в ущелья, листья встроены в деревья, клетки встроены в листья. При любом масштабе можно обнаружить, что одни формы содержат в себе другие» [7]. На каждом уровне детальности формируются свои «естественные» классы и образы по одним и тем же законам. Наиболее общим образом является «образ мира», который формируется начиная с первых дней жизни. Субъект никогда не воспринимает отдельные объекты, а всегда воспринимается некоторая целостная картина. Отдельные объекты выделяются в «видимом поле» [7, 14] в процессе деятельности с этими объектами как с предметами. Предметная деятельность преобразует «видимое поле» в «видимый мир» и «образ мира» [9]. Это не тривиальный процесс, он требует многослойной нейронной обработки, как показано в экспериментах с Deep Learning. Наша формализация в виде циклических причинных связей может осуществлять такую же иерархическую обработку видимого поля в виде иерархии «естественных» классов в соответствии со встроенностью объектов реальности и, как показано в наших экспериментах [4], делает это принципиально точнее, чем Deep Learning.

Восприятие отдельного объекта начинается не с объекта, а с «образа мира»: «Образ мира не складывается из образов отдельных явлений и предметов, а с самого начала развивается и функционирует как некоторое целое. Это значит, что любой образ есть не что иное, как элемент образа мира, и сущность его не в нем самом, а в том месте, в той функции, которую он выполняет в целостном отражении реальности. Эта характеристика образа мира определяется взаимосвязями и взаимозависимостями между элементами самой объективной реальности» [13]. С информационной точки зрения чем выше иерархия некоторого «естественного» класса, тем он устойчивей и инвариантен по отношению к всевозможным вариациям соответствующего образа. В нашей формализации неподвижная точка взаимопредсказаний свойств более высоких по иерархии классов описывается причинными связями с более высокими оценками вероятности. Поскольку предсказания в нашей формализации всегда осуществляются по более высоким закономерностям, то более высокие по иерархии классы начинают доминировать над нижележащими классами и играть ведущую роль.

У. Найсер отмечал, что восприятие как процесс не завершено, пока перцептивный цикл не завершится: «Тахистоскопические эксперименты попросту не относятся к нормальным перцептивным навыкам, и термин «восприятие» в полном смысле слова нельзя отнести к тому, что в них происходит» [10]. Эксперименты с маскировкой стимулов также показывают, что, пока причинные связи не зациклились и не привели к устойчивому циклическому возбуждению (неподвижной точке) предвосхищений и проверке совпадения их с реальными стимулами, мы не можем осознать эту реальность.

Одна из главных ролей сознания – ликвидация противоречий в осознании поступающих стимулов. С информационной точки зрения это старая и до сих пор не решенная проблема философии науки – проблема статистической двусмысленности: при обнаружении причинных связей на данных, как правило, обнаруживается совокупность правил, приводящих к противоречиям. Для разрешения проблемы статистической двусмысленности К. Гемпель предложил использовать максимально специфические правила. Нами предложена формализация максимально специфических правил, для которых не возникает противоречий [23]. Предложена также формальная модель нейрона, удовлетворяющая правилу Хебба и обнаруживающая максимально специфические причинные (условные) связи как замыкания условных связей на уровне нейрона. В нашей формализации причинные связи предсказывают не только наличие свойства (стимула), но и его отсутствие. Таким образом, моделируется не только возбуждение, но и торможение нейронной сети.

Для формализации неподвижных точек предсказания также необходимо было доказать, что в них не возникает противоречий (не происходит одновременное возбуждение и торможение нейрона). Это осуществлено в работах, где неподвижные точки предсказаний формализованы в виде вероятностных формальных понятий [6, 27, 28]. Такие неподвижные точки взаимно предсказывают не только наличие стимулов, но и их отсутствие, которое осуществляет вытормаживание несо-

вместимых с данными предсказаниями стимулов. В частности, это моделирует восприятие иллюзий типа фигура – фон, когда есть два несовместимых образа в виде двух различных неподвижных точек. Осознание поступающей стимуляции требует разрешения противоречия между возникающими неподвижными точками, входящими в стимуляцию фигура – фон. В разрешении противоречий главную роль играют наиболее сильные неподвижные точки наиболее инвариантных классов. В любом случае, пока не сформируется непротиворечивое согласование всех неподвижных точек воспринимаемых в данный момент образов, включая «образ мира», формируя целостную картину воспринимаемой реальности, осознание воспринятого не возникает.

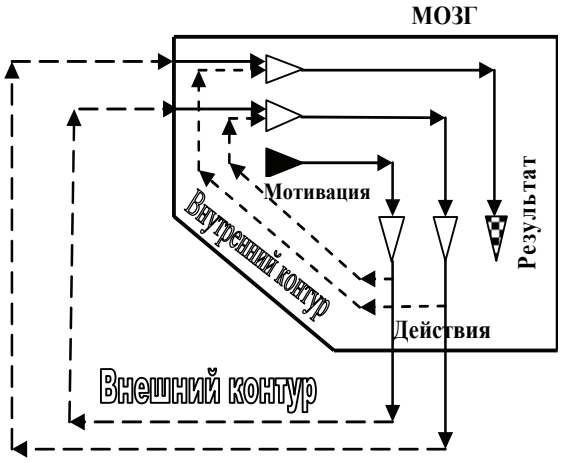


Рис. Формирование акцептора результатов действия

Прогнозирование стимулов и сличение их с реальностью осуществляется не только клеточными ансамблями Хебба, но и через деятельность. Как показано в теории функциональных систем, предвосхищение результатов деятельности реализуется специальными коллатеральными ответвлениями от произведенных действий, которые поступают на «вход» мозга, конвергируя с афферентацией от входных стимулов [15]. Фактически это означает выработку условных (причинных) связей между осуществлением действий (эффекторным возбуждением) и последующим восприятием результатов действий, представленных их афферентными стимулами (см. рисунок). Поэтому предвосхищение некоторого стимула в результате некоторого (перцептивного) действия по внутреннему контуру мозга сопоставляется с реально поступающими стимулами, полученными в результате осуществления этого действия по внешнему контуру. Такое предвосхищение включает процесс прогнозирования достижения целей. Этот процесс, в соответствии с принципом опережающего отражения действительности, детально описан в теории функциональных систем и ее формализациях [1, 3, 8, 15, 25, 26]. В нашей формализации опережающее отражение действительности в полном соответствии с теорией функциональных систем [26] осуществляется причинными связями, представленными на рисунке, и формальными нейронами [24], предсказания по которым непротиворечивы. Осознание всех причинных связей, представленных на рисунке вплоть до предвосхищения достижения результата в виде «аппетита» осуществляется по «внутреннему контуру» работы мозга и включается в сознание.

Суммируя вышесказанное, можно выделить следующие основные функции сознания:

1. Обеспечение логически непротиворечивого и прогностического представления реальности. Это становится возможным за счет хорошей структурированности самого внешнего мира – его причинности, «естественной» классификации и «встроенности». Мозг улавливает эту структурированность клеточными ансамблями и внутренним контуром работы мозга в процессе деятельности, которые в нашей формализации представлены формальной работой нейрона, обнаруживающей причинные связи, а также неподвижными точками предсказаний, образующими логически непротиворечивые модели реальности, включающие как стимулы, которые возможны в данной модели, так и стимулы, которые в данной модели невозможны. Это создает конкуренцию между моделями реальности, учитывая предметность воспринимаемого образа, заставляя сознание искать наиболее непротиворечивую модель («образ мира») реальности («видимое поле»).
2. В создаваемый в данный момент «образ мира» сознание включает, прежде всего, потребности и вероятности их удовлетворения, что вызывает соответствующие эмоции и субъективные состояния (qualia). В вероятностный прогноз не входят автоматизмы действий, поэтому они уходят из сознания.
3. Другой (по отношению к непротиворечивости) основной функцией сознания является постоянная и непрерывная во времени и пространстве проверка совпадения, создаваемой модели реальности («образа мира») и самой реальности. Это осуществляется постоянной проверкой во времени и пространстве совпадения прогнозов, осуществляемых моделью реальности с самой реальностью, что создает ощущение внешнего мира. Поэтому ощущения концентрируются в местах прогноза и контакта прогнозируемых стимулов с реальными. В нашей формализации модель нейрона и неподвижные точки (включая неподвижные точки, основанные на деятельности) осуществляют прогноз. Неподвижная точка замыкает прогнозы внутри себя только в том случае, если все они подтвердились, если нет, то в неподвижной точке возникает противоречие, которое вызывает ориентировочно-исследовательскую реакцию и дальнейшую работу сознания по ликвидации противоречия. Такая работа сознания не может вмешиваться в работу неподвижных точек, поскольку неподвижные точки являются точной моделью реальности, но может изменить поступающую стимуляцию, варьируя условия восприятия.

Литература

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

2. *Витяев Е.Е., Мартынович В.В.* Формализация «естественной» классификации и систематики через неподвижные точки предсказаний // Сибирские электронные математические известия (Siberian Electronic Mathematical Reports) / Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН. 2015. Т. 12. С. 1006–1031.

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

4. *Витяев Е.Е., Неупокоев Н.В.* Математическая модель восприятия и образа // Информационные технологии в гуманитарных исследованиях / ИАЭТ СО РАН. Новосибирск, 2012. Вып. 17. С. 63–72.

5. *Витяев Е.Е., Неупокоев Н.В.* Формальная модель восприятия и образа как неподвижной точки предвосхищений // Подходы к моделированию мышления. М. : УРСС Эдиториал, 2014. С. 155–172.

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

7. *Гибсон Дж.* Экологический подход к зрительному восприятию. М. : Прогресс, 1988. 462 с.

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

9. *Леонтьев А.Н.* Образ мира // *Леонтьев А.Н.* Избранные психологические произведения. М. : Педагогика, 1983. С. 251–261.

10. *Найсер У.* Познание и реальность. М. : Прогресс, 1981. 229 с.

11. *Симонов П.В.* Эмоциональный мозг. М. : Наука, 1981. 140 с.

12. *Симонов П.В.* Высшая нервная деятельность человека : (мотивационно-эмоциональные аспекты). М. : Наука, 1975. 173 с.

13. *Смирнов С.Д.* Психология образа: проблема активности психического отражения. М. : МГУ, 1985. 232 с.

14. *Столин В.В.* Исследование порождения зрительного пространственного образа // Восприятие и деятельность. М., 1976.

15. *Судаков К.В.* Общая теория функциональных систем. М. : Медицина, 1984. 222 с.

16. *Hebb D.O.* The organization of behavior. A neurophysiological theory. N. Y., 1949. 335 p.

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

18. *Oizumi M., Albantakis L., Tononi G.* From the Phenomenology to the Mechanisms of Consciousness: Integrated Information Theory 3.0 // PLOS Computational Biology. 2014. V. 10, Iss. 5.

19. *Mill J.S.* System of Logic, Ratiocinative and Inductive. L., 1843.

20. *Rehder B.* Categorization as causal reasoning // Cognitive Science. 2003. V. 27. P. 709–748.

21. *Rehder B., Martin J.B.* Towards a Generative Model of Causal Cycles // 33rd Annual Meeting of the Cognitive Science Society 2011 (CogSci 2011). Boston, 2011. V. 1. P. 2944–2949.

22. *Rosch E.* Principles of Categorization // Rosch, E. & Lloyd, B.B. (eds), Cognition and Categorization, Lawrence Erl-baum Associates, Publishers, (Hillsdale), 1978. P. 27–48.

23. *Vityaev E.* The logic of prediction // Mathematical Logic in Asia : Proceedings of the 9th Asian Logic Conference (August 16–19, 2005, Novosibirsk, Russia) / ed. S.S. Goncharov, R. Downey, H. Ono : World Scientific. Singapore, 2006. P. 263–276.

24. *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 / eds. A. Chella, R. Pirrone, R. Sorbello, K.R. Johannsdottir. Heidelberg ; N. Y. ; Dordrecht ; L. : Springer, 2013. P. 339–344. (Advances in Intelligent Systems and Computing ; v. 196).

25. *Vityaev E.* Unified formalization of "natural" classification, "natural" concepts, and consciousness as integrated information by Giulio Tononi // The Sixth international conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA 2015, November 6–8, Lyon, France). Elsevier, 2015. P. 169–177. (Procedia Computer Science ; v. 71).

26. *Vityaev E.E.* Purposefulness as a Principle of Brain Activity // Anticipation: Learning from the Past / ed. M. Nadin. Springer, 2015. Chapter 13. P. 231–254. (Cognitive Systems Monographs ; v. 25).

27. *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.

28. *Vityaev E.E., Martinovich V.V.* Probabilistic Formal Concepts with Negation // PSI / A. Voronkov, I. Virbitskaite (Eds.). 2014. P. 385–399. (LNCS ; v. 8974).

Компартментно-кластерные модели эволюции болезни Паркинсона

Ю.В. Вохмина, Д.К. Берестин, Л.Г. Клюс, С.В. Горбунов

Сургутский государственный университет
bdk0720@gmail.com

Введение

Многие регуляторные системы организма человека и других млекопитающих организованы и функционируют по принципу организации компартментных систем. Универсальность компартментно-кластерного подхода объясняется сравнительно большим и универсальным набором базовых принципов организации таких систем, а также наличием хорошо разработанной компартментно-кластерной теории биосистем (ККТБ), основы которой были заложены В.М. Еськовым [2] и рядом других ученых конца XX и начала XXI веков. Болезнь Паркинсона – это заболевание, которое связано с постепенным развитием гипофункции нервных клеток (нейронов), которые вырабатывают медиатор дофамин. Из-за этого в организме человека происходит нарушение регуляции движений и мышечного тонуса, что имеет характерные проявления в виде тремора, а в итоге наблюдается общая скованность и нарушение позы и движений [5–7]. С позиций ККТБ сейчас возникает реальная возможность создания математических моделей, которые бы давали нелинейную (хаотическую с позиции стохастики) динамику параметров нервно-мышечной системы (НМС) человека [3, 5, 6].

Известно, что при этом заболевании снижается уровень дофамина в ЦНС, что опосредованно приводит к снижению торможения в отношении активности стриопаллидарного комплекса (он сильно активируется механизмами обратной отрицательной связи при дефиците дофамина), и далее происходит резкое повышение возбудимости в красном ядре, структурах продолговатого мозга и в итоге в мотонейронах как эффекторном кластере (в наших моделях эти возбуждения описываются слагаемыми в правой части уравнения в виде Ud_1, которое превышает некоторое пороговое значение). Тогда возникает переход от исходной хаотической динамики (характеризует нормальный постуральный тремор) к генерализованным периодическим движениям, характерным для болезни Паркинсона. Этот переход обусловлен известным возбуждением и прекращается в период депрессии красного ядра и при снижении активности ретикулярной формации продолговатого мозга (сон, некоторые транквилизаторы) [1–6].

Краткое описание компартментно-кластерного моделирования

В наших компартментно-кластерных моделях (рис. 1) вся эта регуляторная система определяется состоянием первого (верхнего уровня) кластера. Второй кластер, состоящий из трех компартментов (1-й компартмент – афферентные нейроны, вставочные нейроны – второй компартмент, эфферентные нейроны, посылающие сигналы на мышцы), работает в автоматическом режиме из-за различного уровня драйвов *Ud*, исходящего от 1-го кластера (рис. 1).

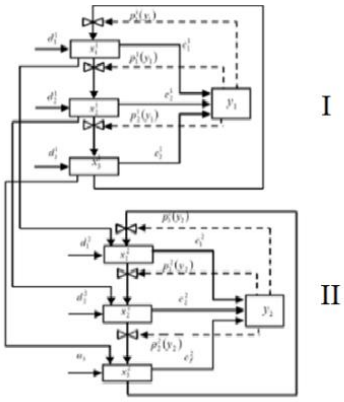


Рис. 1. Графовая структура двухкластерной трехкомпартментной системы регуляции микроперемещений конечности человека (регуляции тремора)

Для структуры рис. 1 можно представить двухкластерную, трехкомпартментную модель в виде системы дифференциальных уравнений. Эта система уравнений, описывающая данную графовую модель, имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_{11}(y_1)x_1 - bx_1 + U_1 d_1, \\ \dot{x}_2 &= A_{21}x_1 + A_{22}(y_2)x_2 - bx_2 + U_2 d_2, \\ y_1 &= c_{11}^T x_1, \\ y_2 &= c_{21}^T x_1 + c_{22}^T x_2. \end{aligned} \qquad (1)$$

Получаемый в результате моделирования выходной от 1-го кластера сигнал $y = y(t)$ при различных внешних управляющих воздействиях (ВУВ) со стороны 1-го кластера в виде *Ud* обладает различными свойствами. Фактически, уровень управляющего сигнала Ud_1 и, как следствие, входной сигнал для 2-го кластера можно условно разделить на три уровня по мере роста значения Ud_1. Конечные значения выходного сигнала $y = y(t)$ и ВУВ Ud_1 зависят от конкретной настройки модели, но выходной моделируемый сигнал на выходе 2-го кластера (т. е. то, что мы регистрируем в эксперименте) может быть разделен на следующие уровни:

1. Хаотический сигнал: сигнал на всём моделируемом интервале времени T изменяется в широких пределах, отсутствует выраженная повторяемость при небольших флуктуациях b (обнаружить равнозначные сигналы в заданных пределах (Δt) затруднительно), амплитудно-частотная характеристика сигнала имеет сложную структуру и

варьируется на всём моделируемом промежутке времени.

2. Квазипериодический сигнал: в сигнале присутствуют повторяющиеся (но не регулярно) процессы, которые можно увидеть даже визуально, но амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) имеет сложную структуру, и периодический сигнал не характеризуется строгим периодическим процессом. В АЧХ более выражены 3–4 частоты (без промежуточных значений), которые зависят от вариации *Ud* и *b*, именно это мы и наблюдаем в АЧХ реального тремора.

3. Вырожденный сигнал: сигнал вырождается в прямую линию, колебательные процессы не наблюдаются, режим соответствует глубоким патологиям, например ригидной форме болезни Паркинсона.

Результаты математического моделирования

Первый уровень соответствует нормогенезу сложных регуляторных биомеханических систем, например НМС в нормальном состоянии (у нас это НМС в норме). Второй уровень – нормогенез сложных биосистем в возбужденном состоянии (непроизвольные движения конечности организма, например холодовой тремор – существенное внешнее воздействие) или локализованный патогенез (паркинсонизм), выраженный патогенез сложных кластеров НМС. Третий уровень – патогенез с высоким уровнем генерализации патологических процессов, когда возникает ригидность в мышцах (сгибатели и разгибатели возбуждаются одновременно) [1, 3, 4].

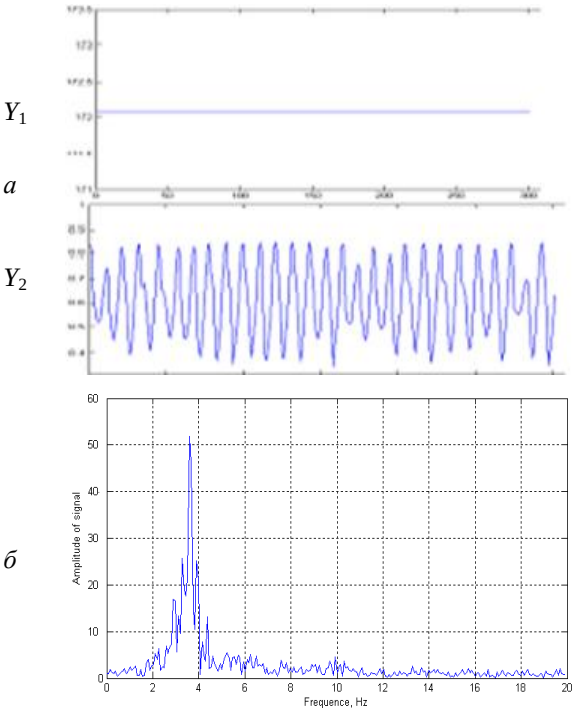


Рис. 2. Выход *Y*(*t*) трехкомпартментной системы в ответ на стационарное воздействие *Ud* = 160 у. е.: *а* – временная развертка выходов $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$ с кластеров верхнего и нижнего уровней иерархии соответственно; *б* – АЧХ интегративной величины y_2

При определенном значении внешнего управляющего драйва (*Ud* = 160 у. е.) хаотический сигнал на выходе системы усиливается по амплитуде (рис. 2, *а*) и частоте. На АЧХ (рис. 2, *б*) можно заметить резкое увеличение амплитуды микроперемещений сигнала в частотном диапазоне от 2 до 4 Гц.

Таким образом, изменяя интенсивность драйва, мы получаем особые характеристики с хаотической динамикой поведения *y*(*t*), что соответствует переходу от нормального функционирования НМС человека (и любых других ФСО) к патологическому. В целом невозможно предсказать значение биоэлектрической активности в последующий момент времени. Это касается и треморограмм, которые связаны с электромиограммами.

При более сильных изменениях *b* и *Ud* можно наблюдать патологические режимы тремора, например при болезни Паркинсона. Действительно, подавая на вход двухкластерной модели в момент времени t_0 некоторое повышенное значение U_0, система генерирует различную активность. Изменяя величину управляющего драйва *Ud*, можно получить разный характер микроперемещений (тремора) на выходе системы – от хаотического до установившегося (стационарного) режима.

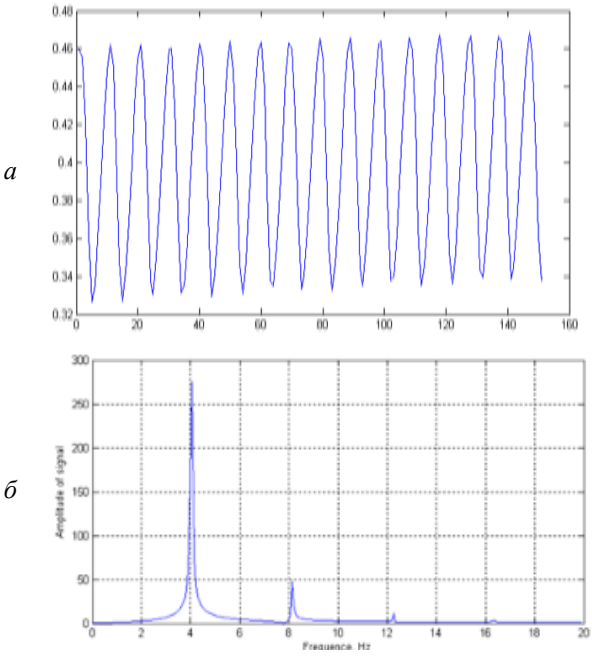


Рис. 3. Модельный сигнал $y_2(t)$ при паркинсоническом треморе: *а* – временная развертка сигнала с выхода $Y_2(t)$ трехкомпартментной системы в ответ на постоянное воздействие *Ud* = 295 у. е.; *б* – АЧХ сигнала

В целом рис. 3 демонстрируют отсутствие возможности повторения не только двух произвольных движений, но и двух одинаковых серий таких (якобы произвольных) движений. Для испытуемого с диагнозом паркинсонизм можно выделить некоторые характерные пики частот в районе 5–8 Гц, что не характерно для условно здорового испытуемого. Модельная треморограмма на рис. 5

повторяет наличие таких максимумов (с изменением масштаба), что подобно рис. 4, где показаны фазовые портреты и АЧХ реальных треморограмм испытуемого с патологией (болезнь Паркинсона).

Появление периодичности в характеристиках тремора (как и в любой реальной биосистеме) соответствует патологическому явлению, например болезни Паркинсона. Во время этого заболевания, как известно, активность мозга возрастает (неконтролируемо) на уровне стриатума. Поэтому для возврата пациента в нормальное состояние задача медиков заключается в подавлении активности стриатума лекарственными препаратами (например, «Юмексом»). Разработанная модель позволяет намеренно уменьшать интенсивность 1-го управляющего кластера (в виде стриатума), что приводит к уменьшению амплитуды перемещений сигнала на выходе первого кластера.

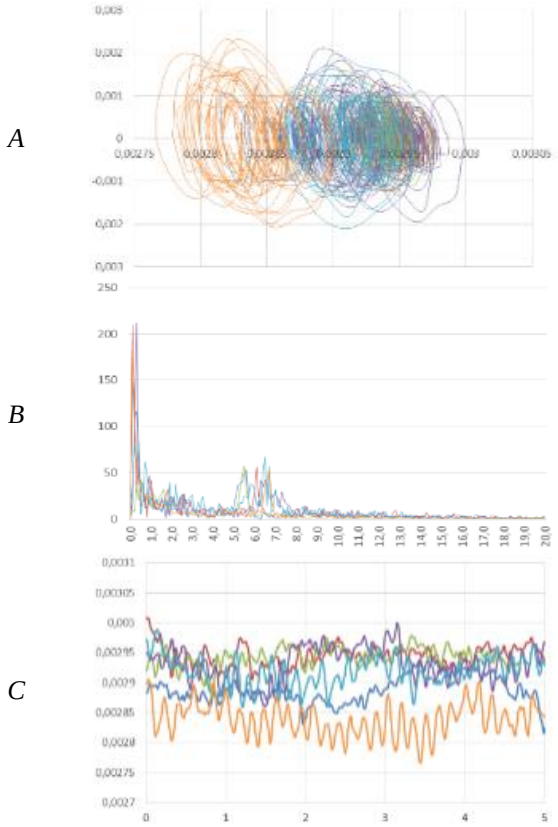


Рис. 4. Общая картина суперпозиции фазовых портретов (*A*), АЧХ (*B*), треморограмм человека с диагнозом болезнь Паркинсона (*C*)

Таким образом, компартментно-кластерная модель обеспечивает иллюстрацию возникновения болезни Паркинсона при снижении уровня дофамина и нарастании активности стриопаллидарного комплекса (нисходящая активация специальных мотонейронов). Возникновение дефицита дофамина в модели проявляется в нарастании драйва *Ud* от 1-го кластера – нейросетей головного мозга, что приводит к бифуркациям рождения циклов, а частоты этих циклов также варьируют с изменением *Ud* и *b*, что согласуется с наблюдениями и представляет краткосрочную эволюцию сложной биосистемы (complexity). Эволюция патологического процесса проявляется в переходе от квазипериодических движений вектора состояния биомеханической системы $x(t)$ к выходу $y(t)$ в виде треморограммы стационарного состояния (ригидная форма болезни Паркинсона).

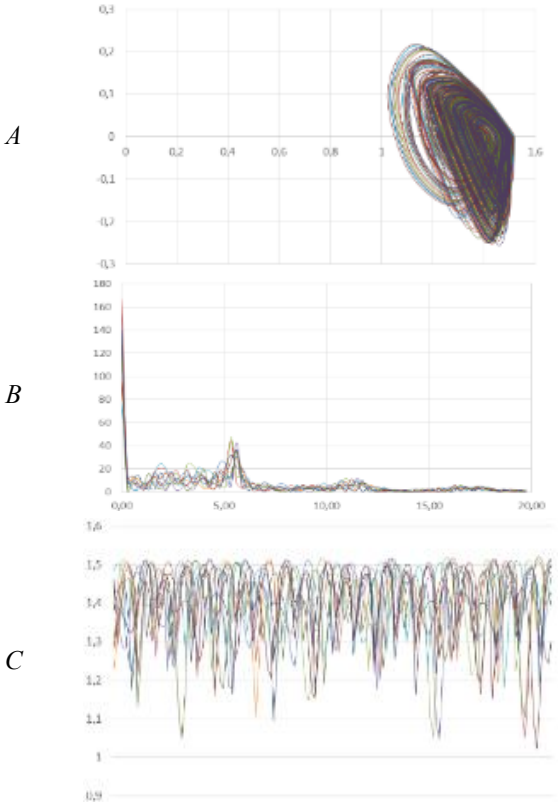


Рис. 5. Результаты моделирования: *A* – суперпозиция фазовых портретов, *B* – АЧХ, *C* – треморограммы модельных данных

Литература

1. *Бетелин В.Б., Еськов В.М., Галкин В.А., Гавриленко Т.В.* Стохастическая неустойчивость в динамике поведения сложных гомеостатических систем // Доклады Академии наук. 2017. Т. 472, № 6. С. 642–644.

2. *Еськов В.М., Полухин В.В., Дерпак В.Ю., Пашнин А.С.* Математическое моделирование непроизвольных движений в норме и при патологии // Сложность. Разум. Постнеклассика, 2015. № 2. С. 75–86.

3. *Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В.* Формализация эффекта «повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Биофизика. 2017. Т. 62, № 1. С. 168–176.

4. *Еськов В.М., Гудков А.Б., Баженова А.Е., Козупица Г.С.* Характеристика параметров тремора у женщин с различной физической нагрузкой в условиях севера России // Экология человека. 2017. № 3. С. 38–42.

5. *Еськов В.М., Баженова А.Е., Вохмина Ю.В., Филатов М.А., Иляшенко Л.К.* Гипотеза Н.А. Бернштейна в описании хаотической динамики непроизвольных движений человека // Российский журнал биомеханики. 2017. Т. 21, № 1. С. 18–28.

6. *Зилов В.Г., Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В.* Экспериментальное подтверждение эффекта «Повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2017. № 1. С. 4–9.

7. *Vokhmina Y.V., Eskov V.M., Gavrilenko T.V., Filatova O.E.* Medical and biological measurements: measuring order parameters based on neural network technologies // Measurement Techniques. 2015. Т. 58, № 4. С. 65–68.

Связанные с поведением суммарные потенциалы мозга при реализации одного и того же инструментального поведения, сформированного разными способами

В.В. Гаврилов

Институт психологии РАН, Москва
nvvgav@mail.ru

Стабильность активации нейрона при реализации одного какого-либо акта поведения – поведенческая специализация нейрона – и зависимость типов специализаций нейронов от истории формирования поведения позволили использовать метод регистрации импульсной активности нейронов в поведении для изучения структуры индивидуального опыта [1–10]. Было установлено, что нейроны одной поведенческой специализации обнаруживаются в разных областях мозга, а рядом расположенные нейроны могут быть специализированы относительно разных актов [1, 3, 7, 12]. Таким образом, под электродом, регистрирующим суммарную электрическую активность мозга (ЭЭГ), оказываются нейроны, активирующиеся при реализации разных актов поведения. При этом при реализации актов поведения активируются нейроны, обеспечивавшие этот акт на разных этапах его становления. Таким образом, мозговая организация поведенческого континуума представляет собой реализацию и смену наборов активирующихся нейронов, а в колебаниях ЭЭГ отражается динамика реализаций и смен поведенческих актов [11–14].

Для внешнего наблюдателя реализация инструментального поведения лабораторных животных выглядит как осуществление сходных актов, например как нажатие на рычаг и захват пищи в кормушке. Однако процедуры научения и последовательность формирования актов у разных животных могли быть разными, что приводило к формированию разной структуры опыта и тем самым разной организации активности мозга при реализации внешне сходного поведения. Для выяснения закономерностей и особенностей активности мозга при реализации инструментального пищедобывательного поведения мы обучали крыс разными способами: 1) с открытыми или закрытыми только на время обучения глазами, т. е. животные имели или не имели возможность использовать оптические параметры среды для организации поведения; 2) путем наблюдения за поведением конспецифика, реализующего поведение, которое впоследствии должен был освоить наблюдатель; 3) кооперируя с конспецификом, т. е. научившись нажимать на рычаг одновременно с партнером, так как только в этом случае оба животных получали порцию пищи. Некоторые результаты этих исследований – данные о скорости научения, времени реализации актов, усредненных от отметок поведения потенциалах мозга, были опубликованы ранее [15–20]. В настоящем работе представлены изменения в организации активности мозга при реализации одного и того же поведения после формирования нового опыта в разных моделях научения.

Методика

Все исследования проводились на взрослых самцах крыс (Long Evans), обучавшихся в экспериментальной клетке, разделенной пополам прозрачной перегородкой. Крысы научались нажимать на педаль, расположенную в одном углу экспериментальной клетки, для получения кусочка сыра в кормушке, расположенной в другом углу клетки. Монополярная регистрация ЭЭГ осуществлялась эпидурально вживленными хлорсеребряными электродами (импеданс около 30 кОм) с индифферентным электродом над обонятельными синусами (a.11, l.1). Для усиления потенциалов мозга использовали DL304 (NeuroBioLab, Ltd) с полосой пропускания 0,1–300 Гц. Зарегистрированы суммарные потенциалы мозга над моторной (a.3, l.3), задней ретросплениальной (p.4, 5, l.1) и зрительной (p.7, l.4) областями коры мозга. Суммарные потенциалы мозга усредняли от отметок поведения – нажатий на педали и их отпусканий, а также от опусканий головы в кормушки и выниманий головы из них. Анализ данных проведен с использованием программы обработки данных Psy (А. Анашкин). Статистические различия оценивались по *t*-критерию.

В первой серии исследования у 8 крыс регистрировали ЭЭГ после того, как они научились инструментальному поведению на первой по времени формирования опыта стороне экспериментальной клетки, а затем, после доучивания на второй стороне, крысы вновь тестировались на первой стороне, что давало возможность сравнить компоненты связанных с событиями потенциалов в поведении до и после обучения такому же поведению на второй стороне (рис. 1).

Во второй серии экспериментов у 14 крыс (7 пар) регистрировали ЭЭГ в индивидуальном поведении до и после научения кооперировать с конспецификом (рис. 2). Крысы в парах были предварительно обучены инструментальному пищедобывательному поведению каждая в своей половине экспериментальной клетки, а затем были вынуждены для получения пищи учиться синхронизировать свое поведение с поведением партнера, реализующего такое же поведение в соседнем отсеке экспериментальной клетки.

В третьей серии регистрировали ЭЭГ у крыс (n = 8), мягко фиксированных в гамаке и предварительно адаптированных к нему в течение 5 еже-

дневных получасовых сессий, наблюдавших за поведением конспецифика-демонстратора, до и после научения их инструментальному поведению, за которым они наблюдали (рис. 3, *C*, *B*). Кроме того, сравнили потенциалы при наблюдении с потенциалами при собственной реализации этого инструментального поведения (рис. 3, *A*).

Результаты

При повторной реализации поведения в первой по времени формирования половине клетки после формирования такого же поведения в другой половине экспериментальной клетки выявлены изменения в связанных с поведением потенциалах, которые нельзя связать ни с изменениями в движениях, ни со скоростью реализации актов (рис. 1).

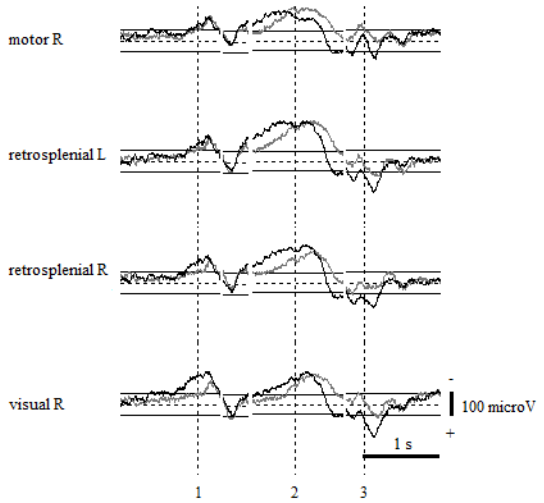


Рис. 1. Пример связанных с поведением потенциалов при реализации пищедобывательного поведения в сессии до (черный цвет) (n = 251 – число реализаций) и после (серый цвет) (n = 171) дополнительного обучения такому же поведению в другом компартменте экспериментальной клетки. Потенциалы мозга усреднены от нажатия на педаль *1*, опускания головы в кормушку *2*, вынимания головы из кормушки *3*. Слева обозначены области регистрации. R – правая, L – левая (указание на позицию электродов над правым или левым полушарием мозга). Видимые различия статистически различаются (t-критерий, $p < 0{,}05$)

В связанных с поведением потенциалах мозга при совместной реализации поведения выявляются изменения на значимых для эффективного завершения поведения этапах (рис. 2, *B*), что может свидетельствовать об особенностях межсистемных отношений на этих этапах, связанных с формированием дополнительного элемента(ов) опыта и/или иными, нежели при индивидуальном поведении, отношениями между уже имеющимися (ранее сформированными) элементами опыта. Сходная конфигурация связанных с поведением потенциалов при совместной реализации поведения в разных областях мозга свидетельствует о системной организации активности мозга в поведении и отсутствии особых структур или особых процессов – «социального мозга» [21]. Как и после доучивания в другой половине клетки (см. выше), при повторении поведения в одиночку также выявляются изменения в связанных с поведением потенциалах (рис. 2, *A*).

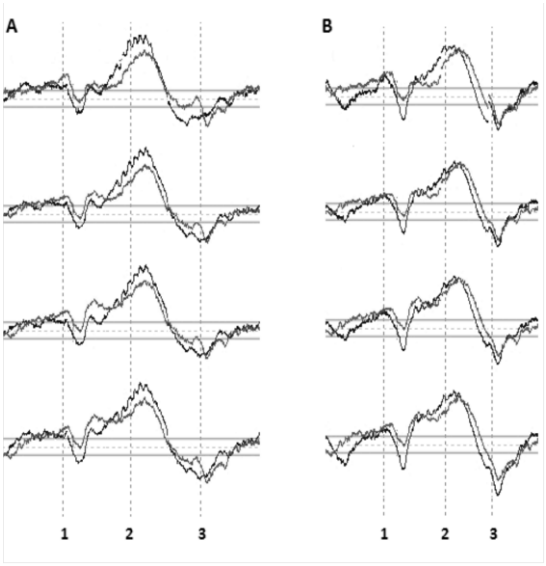


Рис. 2. Пример связанных с поведением потенциалов: *A* – при реализации пищедобывательного поведения в сессии до (серый цвет) (n = 184 – число реализаций) и после (черный цвет) (n = 214) научения синхронизировать свое поведение с поведением конспецифика и *B* – при реализации поведения индивидуально (черный цвет) (n = 184) и в кооперации с конспецификом (серый цвет) (n = 182). Все обозначения как на рис. 1

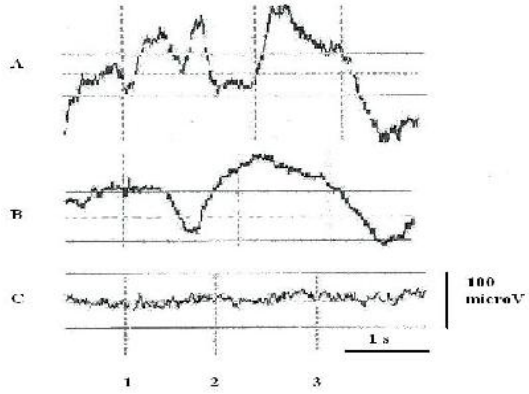


Рис. 3. Пример связанных с поведением потенциалов у наивного наблюдателя при наблюдении за поведением демонстратора (*C*) (n = 33 – число реализаций), при реализации поведения после научения его такому же, как у демонстратора, поведению (*A*) (n = 47) и при наблюдении за демонстратором теперь уже имеющего опыт наблюдателя (*B*) (n = 82). Показаны усредненные потенциалы только в одном отведении – задней ретросплениальной области коры. *1, 2, 3* – моменты синхронизации потенциалов, как на рис. 1 и 2

При наблюдении у наивных животных не выделяются потенциалы, связанные с поведением демонстратора, тогда как при наблюдении у обученных животных выявлена такая же конфигурация ЭЭГ-потенциалов, что и при собственном поведении, но меньшей амплитуды (рис. 3). Это может означать, что уровень активности систем, обеспечивающих поведение, ниже при их актуа-

лизации «во внутреннем плане», чем при реализации поведения во «внешнем плане». Кроме того, при наблюдении у обученных животных смена наборов систем при смене актов происходит раньше, чем при реализации животным этого же поведения, т. е. происходит опережающее (предвосхищающее) отражение поведения демонстратора.

Выводы

Сходная конфигурация ЭЭГ-колебаний над разными областями мозга свидетельствует о системной организации мозговых процессов и отражает динамику реализации и смен поведенческих актов, которая определяется структурой индивидуального опыта, которая, в свою очередь, зависит от истории формирования этого опыта (процедуры и/или последовательности приобретения новых актов поведения).

Сходная конфигурация связанных с поведением потенциалов при реализации одного и того же инструментального пищедобывательного поведения до и после дополнительного научения означает в целом сходную динамику организации активности мозга в сравниваемых условиях, которая определяет реализацию и смену поведенческих актов.

Различия в амплитудно-пространственно-временных параметрах колебаний, связанных с поведением потенциалов, позволяют предположить различия в составе элементов опыта, актуализирующихся на разных этапах поведения при реализации одного и того же поведения, сформированного разными процедурами научения.

Научение как формирование нового элемента опыта, его встраивание в систему элементов уже имеющегося опыта и некоторая реорганизация этого опыта приводит к большей дифференцированности индивидуального опыта и тем самым к более дифференцированному отношению субъекта со средой, при этом в основе внешне сходного поведения может лежать разная структура опыта и разная активность мозга.

Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием ФАНО РФ № 0159-2017-0009 в рамках исследовательской программы ведущей научной школы РФ (НШ-9808.2016.6).

Литература

1. *Швырков В.Б.* Изучение активности нейронов как метод психофизиологического исследования поведения // Нейроны в поведении: системные аспекты. М. : Наука, 1986. С. 6–25.

2. *Shvyrkov V.B.* Behavioral specialization of neurons and the system selection hypothesis of learning // Human memory and cognitive capabilities. Amsterdam : Elsevier, 1986. P. 599–611.

3. *Александров Ю.И.* Психофизиологическое значение активности центральных и периферических нейронов в поведении. М. : Наука, 1989. 208 с.

4. *Alexandrov Yu.I.* [*et al.*] Formation and realization of individual experience: a psychophysiological approach // Conceptual advances in brain research. V. 2. Conceptual advances in Russian neuroscience: Complex brain functions. Amsterdam : Harwood Academic Publishers, 2000. P. 181–200.

5. А*лександров Ю.И.* [*и др.*] Нейронное обеспечение научения и памяти // Когнитивные исследования : сборник научных трудов. М. : Изд-во ГБОУ ВПО МГППУ, 2014. Вып. 6. С. 130–169.

6. *Александров Ю.И.* [*и др.*] Консолидация и реконсолидация памяти: психофизиологический анализ // Вопросы психологии. 2015. № 4. С. 133–144.

7. *Шевченко Д.Г., Александров Ю.И., Гаврилов В.В., Горкин А.Г., Гринченко Ю.В.* Сопоставление активности нейронов различных областей коры в поведении // Нейроны в поведении: системные аспекты. М. : Наука, 1986. С. 25–35.

8. *Gavrilov V.V., Grinchenko Yu.V., Alexandrov Yu.I.* Comparisons of the sets of behaviorally specialized limbic cortex neurons in rats and rabbits // Eur. J. Neurosci. 1998. Suppl. 10. P . 154.

9. *Gorkin A.G., Shevchenko D.G.* The stability of units behavioral specialization // Neurosci. Behav. Physiol. 1991. V. 21. P. 222–229.

10. *Svarnik O.E., Alexandrov Yu.I., Gavrilov V.V., Grinchenko Yu.V., Anokhin K.V.* Fos-expression and task-related neuronal activity in rat cerebral cortex after instrumental learning // Neurosci. 2005. V. 136. P. 33–42.

11. *Швырков В.Б.* Что такое нейрональная активность и ЭЭГ с позиций системно-эволюционного подхода // ЭЭГ и нейрональная активность в психофизиологических исследованиях. М. : Наука, 1987. С. 3–33.

12. *Гаврилов В.В.* Соотношение ЭЭГ и импульсной активности нейронов у кролика в поведении // ЭЭГ и нейрональная активность в психофизиологических исследованиях. М. : Наука, 1987. С. 33–44.

13. *Александров И.О., Максимова Н.Е.* Типология медленных потенциалов мозга, нейрональной активности и динамика системной организации поведения // ЭЭГ и нейрональная активность в психофизиологических исследованиях. М. : Наука, 1987. С. 44–72.

14. *Maksimova N.E., Aleksandrov I.O.* Slow brain potentials and their relation to the structure of behavior // Current Trends in Event-Related Potential Research. Amsterdam : Elsevier, 1987. EEG Suppl. 40. P. 4–7.

15. *Гаврилов В.В., Гринченко Ю.В., Александров Ю.И.* Наблюдение и принятие решения: актуализация опыта «внешнего» поведения во внутреннем плане // Матер. науч. конф. ИП РАН (24–25 февраля 2011). М. : Институт психологии РАН, 2011. С. 84–94.

16. *Arutyunova K.R., Gavrilov V.V.* Learning and performing the task with closed and open eyes in rats and humans // Пятая Междунар. конф. по когнитивной науке. Калининград, 2012. Т. 1. С. 23–25.

17. *Арутюнова К.Р., Гаврилов В.В.* Обучение и поведение в отсутствие контакта с оптическими параметрами среды у видов с разным экологическим зрением // Эволюционная и сравнительная психология в России: традиции и перспективы. М. : Институт психологии РАН, 2013. С. 98–105.

18. *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.

19. *Гаврилов В.В.* Актуализация элементов индивидуального опыта при отсутствии внешне наблюдаемого поведения // Тенденции развития современной психологической науки : тезисы науч. конф. М. : Институт психологии РАН, 2007. С. 319–321.

20. *Гаврилов В.В., Арутюнова К.Р.* Формирование индивидуального опыта в модели кооперативного поведения у крыс // Эволюционная и сравнительная психология в России: традиции и перспективы. М. : Институт психологии РАН, 2013. С. 106–112.

21. *Adolphs R.* The neurobiology of social cognition // Current Opinion Neurobiol. 2001. V. 131. P. 231–239.

Модель классификации и поиска музыкальных записей

В.Е. Гай, М.О. Дербасов

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

Развитие и удешевление звукозаписывающих технологий и способов передачи данных породило всплеск количества музыкальных композиций в сети Интернет. К примеру, сервис Google Play Music предоставляет более 37 миллионов записей, а площадка по определению трека Shazam имеет более 5 миллиардов треков в своей базе. В данной ситуации становится актуальной задача точного и быстрого поиска по музыкальным записям. Причем по мере увеличения количества звуковых записей потребность в возможности поиска будет только возрастать.

Существующие методы поиска звуковой информации можно разделить на два типа: поиск по текстовым аннотациям (тегам, Description-Based Sound Retrieval, DBSR) и поиск по содержанию (Content-Based Sound Retrieval, CBSR).

Поиск на основе текстовой информации имеет достаточно сильные недостатки: необходимо создать текстовое описание для каждого звукового сигнала, что затруднительно, а неоднозначность соответствия содержания и текстового описания звукового файла снижает показатели точности и полноты поиска.

Системы поиска звуковых файлов по содержанию не требуют наличия дополнительной информации о файле. Поиск в таких системах производится с помощью анализа и сравнения характеристик звуковых файлов.

Система идентификации звукового сигнала должна достаточно быстро и с минимальным уровнем ошибок находить звуковой сигнала в базе данных по его фрагменту. Фрагмент сигнала может быть искажен, а его длительность может составлять единицы секунд. Время работы алгоритма в идеальном случае должно не сильно зависеть от количества записей в базе данных.

Область использования такого поиска не ограничивается задачей идентификации музыкальных произведений по содержимому фрагмента. Возможно применение при решении следующих задач: работа с незашумлённым сигналом, претерпевшим перекодирование в другой формат, что позволяет находить дубликаты в коллекции произведений (эта задача встает при обнаружение нарушений авторского права); поиск стилистически похожих музыкальных произведений, включающий в себя поиск новых аранжировок; извлечение музыкальных характеристик (ритм, жанр, музыкант, композитор) для построения списка рекомендаций и поиска плагиата.

Вместе с идентификацией музыкальных произведений по фрагменту алгоритмы идентификации имеют и другое практическое применение: идентификация звуков, издаваемых больными людьми, для установления диагноза и при дальнейшем наблюдении за ходом заболевания; идентификация звуков, генерируемых различными приборами, двигателями автомобилей, самолетов и другими механизмами, для решения задач диагностирования и прогнозирования неполадок; автоматический контроль количества воспроизведения рекламных роликов или музыкальных клипов в сетях телерадиовещания.

Настоящая работа посвящена применению теории активного восприятия (ТАВ) к решению задачи идентификации звукового сигнала [1].

Обзор алгоритмов идентификации

Простейшее решение задачи идентификации звукового сигнала по его фрагменту состоит в прямом сравнении амплитуд исходного и искомого звуковых сигналов в определенный момент времени. Недостатки такого алгоритма заключаются в низкой устойчивости к искажению искомого сигнала, а также в большом потреблении процессорного времени.

В работе [2] описывается алгоритм выявления корреляционной зависимости между сигналами и алгоритм идентификации сигналов на его основе. В качестве характеристики измерения корреляционной зависимости используется линейный коэффициент корреляции. Линейный коэффициент корреляции принимает значения на отрезке от –1 до +1. Значения коэффициента близкие к +1 указывают на большее подобие сравниваемых сигналов. Этот алгоритм имеет те же недостатки – низкую устойчивость к искажениям и большое время работы.

Для построения помехоустойчивой системы идентификации звукового сигнала необходимо создать описание сигнала (цифровой отпечаток сигнала). Цифровой отпечаток в идеале должен быть устойчив к различным искажениям сигнала.

В этом случае процесс идентификации звукового сигнала по его фрагменту заключается в следующем: извлечение из эталонных сигналов отпечатков, которые помещаются в хранилище; отпечаток неизвестного сигнала сравнивается с большим набором отпечатков из хранилища; кандидаты на соответствие оцениваются на точное совпадение.

Рассмотрим некоторые известные алгоритмы генерации цифровых отпечатков.

Алгоритм формирования цифрового отпечатка, описанный в [3] заключается в следующем: звуковой сигнал длительностью 3 секунды разбивается на перекрывающиеся во времени сегменты; для сигнала рассчитывается 32-битный цифровой отпечаток, который формируется из преобразова-

ния Фурье каждого из сегментов. В рамках данного алгоритма два трехсекундных звуковых сигнала считаются совпавшими, если расстояние Хемминга между ними меньше некоторого порога. Достоинства алгоритма: высокая помехоустойчивость и скорость работы, недостатки: большое время генерации отпечатка из-за перекрытия сегментов, отсутствие инвариантности к сжатию и растяжению сигнала.

Алгоритм, описанный в [4], формирует на основе преобразования Фурье спектрограмму сигнала. Отпечаток сигнала вычисляется на основе точек, соответствующих локальным максимумам спектрограммы. Далее для повышения помехоустойчивости описания создаются связи между парами локальных максимумов. Полученная информация о связях используется для формирования хэш-кода, который упаковывается в 32-разрядное число. В итоге из множества таких хэшкодов получается цифровой отпечаток, используемый для идентификации сигнала.

В работах [5–7] для получения спектрограммы сигнала используют оконное преобразование Фурье с различной величиной и степенью перекрывания окна. На основе полученной спектрограммы вычисляются устойчивые признаки сигнала и формируется его цифровой отпечаток.

Известны алгоритмы, использующие для формирования цифрового отпечатка вейвлет-преобразование [8].

Подход к идентификации звукового сигнала с помощью модели гауссовых смесей, а также на основе других признаков, таких как энтропия Шеннона, энтропия Реньи, мел-кепстральные коэффициенты описан в [9].

В работе [10] описываются наиболее известные признаки, вычисляемые по звуковому сигналу. Приводится архитектура систем поиска звукового сигнала по его содержимому, описываются проблемы проектирования таких систем и методы их решения.

Информационная модель системы идентификации звукового сигнала

Построение модели классификации и поиска музыкальных записей основывается на предположении, что можно вычислить стабильный по отношению к искажениям входного сигнала отпечаток для некоторой части исходного сигнала. Разрешение коллизий будет производиться при помощи последовательности отпечатков.

Расчет отпечатков будет производиться по следующему алгоритму:

1) выбирается небольшой фиксированный по времени интервал из входного сигнала;

2) вычисляется вектор частичных сумм, равный по длине размерности фильтрам;

3) на основе вектора частичных сумм рассчитываются отклик фильтров *U*-преобразования;

4) выбирается фильтр с максимальным по абсолютному значению откликом – его номер вместе со знаком используется для формирования разряда отпечатка; также при помощи частичных сумм из сигнала выбирается одна из двух половин, содержащая максимальную по уровню частичную сумму и операция повторяется несколько раз для получения остальных разрядов отпечатка;

5) отпечаток добавляется в хранилище с привязкой к текущему музыкальному файлу и времени в нем, после чего берется следующий интервал.

Вычислительный эксперимент

Для проведения эксперимента было разработано приложение на языке C++. Данный язык был выбран, поскольку он спроектирован так, чтобы дать программисту максимальный контроль над всеми аспектами структуры и порядка исполнения программы, что позволяет достичь высокой производительности кода. C++ также имеет высокую совместимость с языком C, на котором чаще всего разрабатывают различные библиотеки по работе с разными форматами файлов.

Для работы с медиафайлами выбрана библиотека mpg123. Данный выбор обусловлен несколькими критериями: исходный код библиотеки распространяется под свободной лицензией GNU Lesser General Public License, что позволяет не только портировать приложение на специфичные платформы, но еще и в случае возникновения вопросов или проблем ознакомиться с ее внутренним строением. Также эта библиотека имеет долгую историю использования в отрасли и постоянную поддержку и разработку, что в итоге позволяет доверять качеству и производительности ее работы.

Для ускорения и упрощения проведения экспериментов статические данные не вычисляются каждый раз, а кэшируются. При выборе хранилища мы руководствовались требованиями простоты использования и возможности просмотра в сторонних утилитах для визуализации или анализа. Для этих целей была выбрана встраиваемая база данных SQLite. Она обеспечивает удобный интерфейс для доступа и хранения данных с использованием языка запросов SQL. Вместе с этим она предоставляет возможность использования сторонних приложений для визуализации, к примеру sqlitebrowser.

Эксперимент проводился на 2696 произведениях современной музыки со средней длительностью трека 231 секунда. Длительность отрезка входного сигнала, выбранная для расчета, равна одной секунде. Количество дихотомий изначального сегмента взято равным пяти. Поскольку использовалось 15 фильтров, с учетом знака получено 24 300 000 возможных значений отпечатков сигнала.

Одним из критериев качества полученных отпечатков можно считать количество коллизий в зависимости от длины рассматриваемой последовательности, другими словами – как часто последовательность из *N* элементов встречается в разных файлах. Предполагается, что у слабокоррели-

рующих отпечатков чем больше длина последовательности, тем реже она будет встречаться более чем в одном файле. Далее на графике показаны результаты эксперимента, в котором отмечено количество совпадений между разными файлами, имеющими последовательности одинаковой длины.

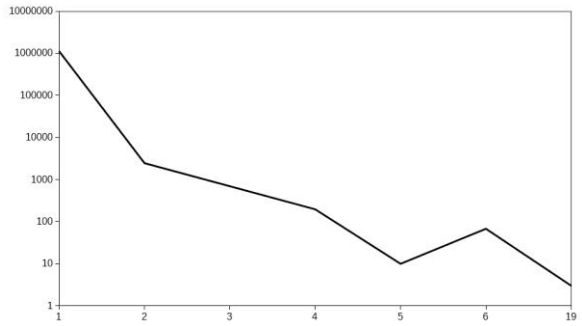


Рис. 1. Количество коллизий
в зависимости от длины последовательности

Стоит упомянуть, что значение, приведенное на графике, отображает количество всех последовательностей данной длины, и считать что, к примеру, конкретная последовательность из двух отпечатков выдаст несколько тысяч возможных треков, будет неверно.

В результате работы мы получили теоретическую модель классификации и поиска музыкальных записей. Создали ее реализацию на языке программирования C++ и провели теоретический анализа на основе поставленного эксперимента. Полученные результаты позволяют на данном этапе утверждать, что данный подход имеет потенциал и должен быть проанализирован при помощи других экспериментов и метрик.

Литература

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

2. *Аврамчук В.С., Чан В.Т.* Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов // Изв. Томского политех. ун-та. 2009. Т. 315, № 5.

3. *Haitsma J., Kalker T.* A Highly Robust Audio Fingerprinting System // The International Symposium on Music Information Retrieval (ISMIR). Paris, 2002. P. 107–115.

4. *Wang A.* An industrial strength audio search algorithm // The International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR). 2003.

5. *Kurth F.* A Ranking Technique for Fast Audio Identification // International Workshop on Multimedia Signal Processing. St. Thomas, US Virgin Islands, December 9–11, 2002.

6. *Poulos M., Deliyannis I., Floros A.* Audio Fingerprint Extraction Using an Adapted Computational Geometry Algorithm // Computer and Information Science. 2012. V. 5(6). P. 88–97.

7. *Рабинович Е.В., Шехирев А.В.* Сжатое представление музыкальных сигналов для поиска музыкальных произведений // Интернет-математика 2007 : сб. работ участников конкурса науч. проектов по информ. поиску. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2007. С. 181–190.

8. *Baluja S., Covell M.* Audio fingerprinting: Combining computer vision & data stream processing // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). 2007.

9. *Ramalingam A., Krishnan S.* Mixture Modeling Using Short Time Fourier Transform Features For Audio Fingerprinting // IEEE Trans. on Information Forensics and Security. 2006. December.

10. *Mitrovic D., Zeppelzauer M., Breiteneder C.* Features for Content-Based Audio Retrieval // Advances in Computers. Elsevier, 2010. V. 78 : Improving the Web. P. 71–150.

Гомеостатические системы и теорема Такенса об обнаружении «странных аттракторов»

В.А. Галкин, В.М. Еськов, Т.В. Гавриленко, И.Н. Девицын

Сургутский государственный университет

Теорема Такенса позволяет идентифицировать наличие «странных аттракторов» в фазовом пространстве динамической системы при определённых диапазонах значений топологической энтропии и предельной ёмкости. В работе рассматривается проблема обнаружения «странных аттракторов» с применением теоремы Такенса на примере различных типов экспериментальных данных, включая данные медико-биологических исследований. Обработка данных проводится с помощью вычислительной схемы, описанной самим Ф. Такенсом, но применение данной схемы не освещено в литературе. Мы выполнили расчёты, а также сравнение результатов для экспериментальных данных по гомеостатическим системам и для решения системы Лоренца. По итогам сравнения можно сделается вывод о том, что величины топологической энтропии и предельной ёмкости для систем с наличием «странных аттракторов» или с их отсутствием практически совпадают. Данная проблема требует дальнейших исследований.

Математическое моделирование гомеостатических систем и анализ их параметров x_i являются очень сложной задачей для исследователя с позиции детерминистско-стохастической науки (ДСН). Биологические системы зачастую бывает невозможно описать с помощью периодических законов, потому что при одинаковых внешних условиях и начальных параметрах они ведут себя каждый раз по-разному, что является одним из признаков хаотических динамических систем. Ф. Такенс в [6, 7] показал способ, с помощью которого теоретически можно проверить наличие «странных аттракторов» в фазовом пространстве динамической системы с позиции теории динамического хаоса. Аттрактор – это компактное подмножество фазового пространства динамической системы, траектории из некоторой окрестности которого стремятся к нему при времени, стремящемся к бесконечности. «Странные» же аттракторы, в отличие от классических, обладают непериодической траекторией, неустойчивым режимом функционирования и характеризуются высокой чувствительностью к начальным условиям [1–5]. В разрабатываемой нами теории хаоса – самоорганизации (ТХС) вводится понятие квазиаттрактора (КА), который тоже отличается от квазиаттракторов в теории динамического хаоса (в ТХС КА показывает статистическую неустойчивость у подряд получаемых выборок x_i, например для тремограмм (ТМГ)).

Согласно теореме Такенса, временной ряд $\{x_i\}_{i=1}^{\infty}$ может быть представлен гладкой детерминированной моделью, если $\frac{\ln C_{n,\varepsilon}}{n}$ равномерно ограничена при $n \to \infty$. Для такого ряда может быть рассчитана топологическая энтропия

$$H = \lim_{\varepsilon \to 0} \left(\lim_{n \to \infty} \sup \left(\frac{ln C_{n,\varepsilon}}{n} \right) \right) \qquad (1)$$

и предельная ёмкость

$$D = \lim_{n \to \infty} \left(\lim_{\varepsilon \to 0} \inf \left(\frac{ln C_{n,\varepsilon}}{-\ln \varepsilon} \right) \right), \qquad (2)$$

где $C_{n,\varepsilon}$ – число элементов множества $J_{n,\varepsilon} \subset N_0$. $J_{n,\varepsilon}$ определено следующим образом: $0 \in J_{n,\varepsilon}$, $i > 0, i \in J_{n,\varepsilon} \Leftrightarrow$ для всех $0 \le j \le i, j \in J_{n,\varepsilon}$, $\max\left(|x_i - x_j|, |x_{i+1} - x_{j+1}|, \ldots, |x_{i+n} - x_{j+n}|\right) \ge \varepsilon$.

Можно говорить о наличии «странных аттракторов» в $\{x_i\}$, если топологическая энтропия $\{x_i\}$ положительна, а предельная ёмкость стремится к нецелому значению.

Для расчёта энтропии и предельной ёмкости конечной последовательности данных $\{x_i\}_{i=1}^{N}$ Такенс предлагает поступать следующим образом:

1) для всех $n + m \le N$ множества $J_{n,\varepsilon,m} \subset N_0$ определить так:

$$0 \in J_{n,\varepsilon,m}, i > 0, \qquad (3)$$

2) $i \in J_{n,\varepsilon,m}$, если одновременно выполняются условия:

а) $i \le m$;

б) для всех $j < i,\ j \in J_{n,\varepsilon,m}$,

$\max_{0 \le k \le n} |x_{i+k} - x_{j+k}| \ge \varepsilon$,

используя при расчётах предельной ёмкости и энтропии $C_{n,\varepsilon,m}$ – число элементов множества $J_{n,\varepsilon,m}$ как аппроксимацию $C_{n,\varepsilon}$ [6].

На основе данной теоремы была разработана схема расчёта (рис. 1).

Рис. 1. Схема расчёта

Ключевым моментом является заполнение множеств $J_{n,\varepsilon,m}$ согласно условиям (3), после чего производится расчёт предельной ёмкости и топологической энтропии по формулам (2) и (1) соответственно. Этап заполнения множеств $J_{n,\varepsilon,m}$ более подробно изображён на рис. 2.

Для тестирования данного алгоритма были выбраны наборы исходных данных в виде тремограмм: данные x_i из аттрактора Лоренца и последовательность равномерно распределённых случайных чисел на отрезке [0; 0,1]. Для корректного сравнения результатов все данные были нор-

мированы. Для исходных данных также вычислялась информационная энтропия Шеннона:

$$H_{\text{ш}}(x) = -\sum_{i=1}^{n} p(i)\ln p(i), \qquad (4)$$

где $p(i)$ – относительная частота появления события i, т. е. нахождения системы в i-м состоянии. Информационная энтропия показывает, насколько неопределённым или непредсказуемым будет i-е состояние системы. Поскольку в формуле применяется натуральный логарифм, данная величина измеряется в натах. Результаты расчёта приведены в табл. 1.

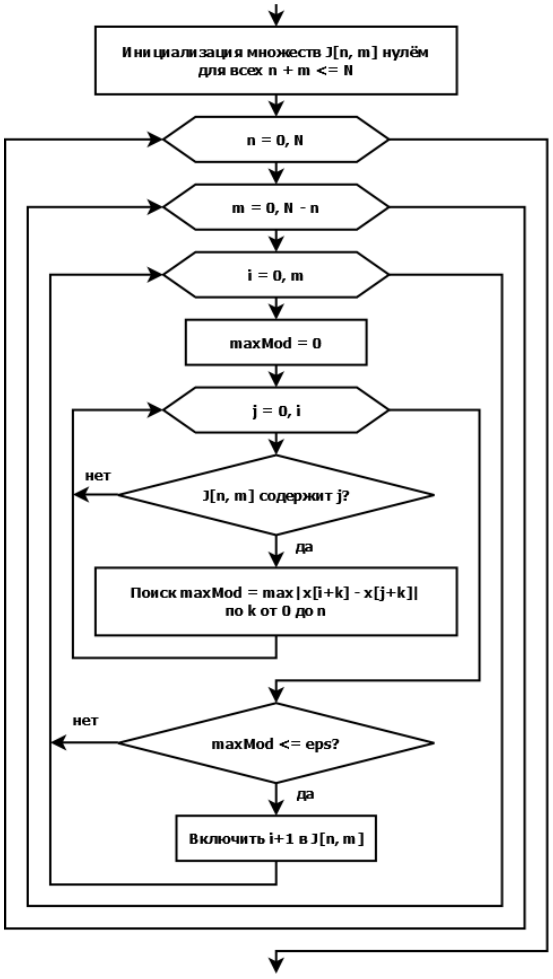


Рис. 2. Алгоритм заполнения множеств $J_{n,\varepsilon,m}$

Таблица 1

Результаты расчёта энтропии *H*, предельной ёмкости *D* и энтропии $H_{\text{Ш}}$

Исходные данные	Треморограмма	Равномерное распределение
N = 100, ε = 0,01	H = 0,04631 D = 0,99561 $H_{\text{ш}}$ = 2,10166	H = 0,04642 D = 0,99782 $H_{\text{ш}}$ = 2,26594
N = 100, ε = 0,001	H = 0,04642 D = 0,66521 $H_{\text{ш}}$ = 2,10166	H = 0,04652 D = 0,66667 $H_{\text{ш}}$ = 2,26521
N = 200, ε = 0,01	H = 0,02657 D = 1,14833 $H_{\text{ш}}$ = 2,15983	H = 0,02662 D = 1,15051 $H_{\text{ш}}$ = 2,28354
N = 500, ε = 0,01	H = 0,01245 D = 1,34861 $H_{\text{ш}}$ = 2,05166	H = 0,01245 D = 1,34949 $H_{\text{ш}}$ = 2,29313

Расчёты показывают, что информационная энтропия напрямую зависит от исходных данных. Показано, что увеличение выборки данных не оказывает существенного влияния на значение энтропии. На основе значений, рассчитанных по Такенсу, можно сделать вывод о том, что величина топологической энтропии и предельной ёмкости практически не зависит от исходных данных, а существенно зависит от величины ε и объёма выборки данных N.

Для проверки данного предположения в качестве исходных данных было выбрано классическое решение системы Лоренца (5) с параметрами σ = 10, ρ = 28 и β = 8/3.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \sigma(y - x), \\ \frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y, \\ \frac{dz}{dt} = xy - \beta z. \end{cases} \qquad (5)$$

По результатам расчётов (табл. 2, рис. 3) можно видеть, что значения топологической энтропии для решения системы Лоренца практически не отличаются от соответствующих значений для прочих тестовых данных. Информационная энтропия решения системы Лоренца с ростом объёма выборки данных также меняется не столь существенно, стабилизируясь по мере формирования «странного аттрактора».

Таблица 2

Результаты расчёта для решения системы Лоренца

N = 100 ε = 0,01	N = 500 ε = 0,01	N = 1000 ε = 0,01
H = 0,04631 D = 0,99561 $H_{\text{ш}}(x)$ = 1,875 $H_{\text{ш}}(y)$ = 1,776 $H_{\text{ш}}(z)$ = 1,974	H = 0,01245 D = 1,34861 $H_{\text{ш}}(x)$ = 2,060 $H_{\text{ш}}(y)$ = 1,992 $H_{\text{ш}}(z)$ = 2,030	H = 0,00693 D = 1,49957 $H_{\text{ш}}(x)$ = 2,045 $H_{\text{ш}}(y)$ = 1,938 $H_{\text{ш}}(z)$ = 1,955

Ф. Такенс в [6] после доказательства своей теоремы приводит важное указание на то, каким образом нужно производить расчёты для конечных последовательностей данных (3), при этом отмечая, что $C_{n,\varepsilon,m}$ можно использовать как аппроксимацию $C_{n,\varepsilon}$ при условии, что разница между величинами $C_{n,\varepsilon,m}$ и $C_{n,\varepsilon,\frac{m}{2}}$ несущественна, а именно порядка 1–2 %. Тем не менее нам при расчётах не удалось получить характер заполнения множеств $J_{n,\varepsilon,m}$, отличный от линейного при достаточно малых ε.

Дополнительным препятствием служит тот факт, что применение данной теоремы существенно ограничено высокой вычислительной сложностью. Оценка вычислительной сложности используемого алгоритма заполнения множеств $J_{n,\varepsilon,m}$ составляет $O(N^4)$, этим обусловлен очень быстрый рост времени расчёта в зависимости от объёма выборки исходных данных. Вероятно, именно по этой причине данная вычислительная схема не получила широкого распространения.

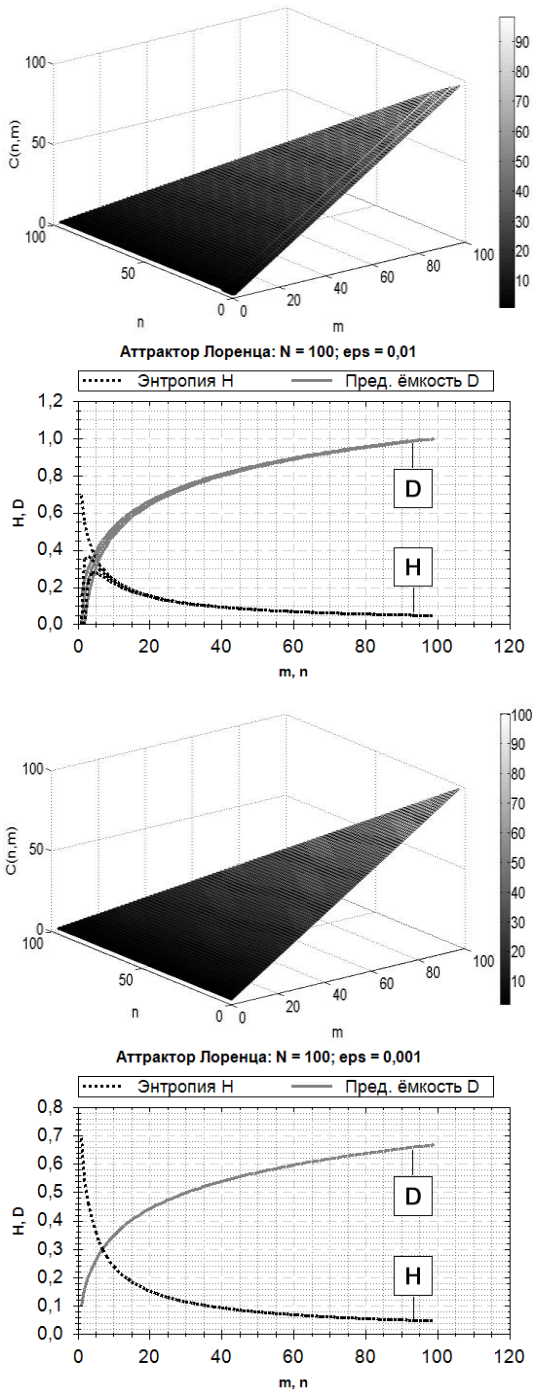


Рис. 3. Графики заполнения множеств $J_{n,\varepsilon,m}$ и результаты расчёта для решения системы Лоренца

Таким образом, в данной работе мы не получили подтверждение того, что величины топологической энтропии и предельной ёмкости, рассчитанные по теореме Такенса, отличаются для систем с наличием или отсутствием «странных аттракторов». Важным практическим применением данной теоремы является восстановление фазового пространства динамической системы по одной временной переменной при наличии достаточного количества экспериментальных данных методом запаздывания. Саму теорему Такенса в иностранной литературе зачастую называют Delay Embedding Theorem, так как на основе идей Такенса построен данный метод.

Имея запись зависимости наблюдаемой переменной по времени $x = x(t)$, зададимся некоторым временным шагом τ и целым числом m и построим m-мерный вектор:

$$x(t) = \\ = (x(t), x(t-\tau), x(t-2\tau), \dots, x(t-(m-1)\tau)). \quad (6)$$

Вектор $x(t)$ задаёт точку в m-мерном пространстве, которая с течением времени tперемещается по некоторой траектории. В дискретном случае

$$\boldsymbol{x}_k = \left(x_k, x_{k-p}, x_{k-2p}, \dots, x_{k-(m-1)p}\right). \quad (7)$$

При переборе по k получаем дискретный набор точек m-мерного пространства. Предположив, что мы имеем дело с установившимся режимом колебаний диссипативной системы, при данном построении можно получить реконструктивный портрет аттрактора [6, 7]. Однако для ТМГ такая процедура не обеспечивает получение странного аттрактора.

В отличие от оценок топологической энтропии, восстановление фазового пространства сложных биологических систем может быть выполнено с относительно высокой точностью.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (15-41-00059р_урал_а, 14-01-00478 А).

Литература

1. *Берестин Д.К., Черников Н.А., Поскина Т.Ю., Потетюрина Е.С.* Хаотическая динамика амплитудно-частотных характеристик треморограмм при многократных повторах измерений // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. №1. С. 71–78. DOI: 10.12737/18815.

2. *Кузнецов С.П.* Динамический хаос : курс лекций. Изд. 2, перераб. и доп. М. : Физматлит, 2001.

3. *Betelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A., Gavrilenko T.V.* Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems // Doklady Mathematics. 2017. V. 95, № 1. P. 92–94.

4. *Eskov V.M., Bazhenova A.E., Vochmina Y.V., Filatov M.A., Ilyashenko L.K.* Bernstein hypothesis in the description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // Russian Journal of Biomechanics. 2017. V. 21 (1). P. 14–23.

5. *Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Vochmina Yu.V.* Formalization of the Effect of “Repetition without Repetition” by N.A. Bernstein // Biofizika. 2017. V. 62 (1). P. 143–150.

6. *Takens F.* Detecting strange attractors in turbulence // *Rand D.A., Young L.-S.* Dynamical Systems and Turbulence. Springer-Verlag, 1981. P. 366–381. (Lecture Notes in Mathematics ; v. 898).

7. *Packard N.H., Crutchfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S.* Geometry from a Time Series // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45(9). P. 712–716.

Динамика формирования навыка представления движений у оператора контура интерфейса «мозг – компьютер» с тактильной обратной связью

Н.А. Григорьев[1], М.В. Лукоянов[1,3], С.Ю. Гордлеева[1], А.С. Пимашкин[1], А.В. Савосенков[1], В.Б. Казанцев[1], А.Я. Каплан[1,2]

[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[3]Нижегородская государственная медицинская академия

Интерфейс «мозг – компьютер» – это программно-аппаратная система, позволяющая оператору управлять внешними исполнительными устройствами при помощи мысленных усилий. В наше время разработка подобных технологий востребована не только благодаря дополнительному каналу связи и возможности использования протезов и экзоскелетов посредством интерфейса [1–3], но и по причине использования нейрокомпьютерного интерфейса в восстановлении двигательной активности парализованных конечностей у пациентов, переживших инсульт [4, 5].

Очень важным аспектом интерфейса «мозг – компьютер» является обратная связь, ибо она замыкает контур и способствует тренировке в управлении, а впоследствии возможному образованию привычки в использовании интерфейса.

Целью данной работы является изучение динамики формирования навыка представления движений у пользователей ИМК на основе представления движения при тактильной обратной связи.

Методика

В исследовании приняли участие 5 здоровых испытуемых-добровольцев (3 женщины и 2 мужчины) в возрасте 18–23 лет. Испытуемые ранее не имели опыта в использовании ИМК, все праворукие (медиана 0,7 балла согласно опроснику мануальной асимметрии по [6]). Всеми испытуемыми было подписано Информированное согласие на участие в исследовании. Протокол исследования был одобрен этической комиссией Института биологии и биомедицины ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Регистрация ЭЭГ осуществлялась с помощью энцефалографа NVX52 (ООО «Медицинские Компьютерные Системы», Россия) посредством 30 Cl/Ag электродов, расположенных по системе 10–10 (FT7, FC5, FC3, FC1, FCz, FC2, FC4, FC6, FT8, T7, C5, C3, C1, Cz, C2, C4, C6, T8, TP7, CP5, CP3, CP1, CPz, CP2, CP4, CP6, TP8, P3, P4, POz) относительно расположенных на мастоидах референтных электродов. Заземляющий электрод располагался на лбу. Сопротивление на электродах не превышало 10 кОм. ЭЭГ фильтровалась в частотном диапазоне 1–30 Гц с Notch-фильтром 50 Гц и оцифровывалась с частотой дискретизации сигнала 1000 Гц.

Каждый испытуемый принял участие в двух этапах эксперимента. В начале каждого этапа проводился контроль самочувствия, активности и настроения испытуемого (тест САН [7]). Во время эксперимента испытуемый сидел в комфортном кресле. Экспериментальная сессия состояла из 10–15 записей, в ходе которых испытуемый с короткими паузами непрерывно исполнял череду ментальных задач в ответ на командные пиктограммы, предъявляемые на ЖК-мониторе (диагональ 19 дюймов), расположенном на расстоянии 2 м от глаз.

В качестве ментальных задач было выбрано мысленное представление испытуемым движений рук и задача «покой», во время которой испытуемому рекомендовалось расслабиться и фокусировать внимание на дыхании. В одной записи в случайном порядке комбинировались 3 типа стимулов: представление движения левой рукой, представление движения правой рукой и покой.

Целью первого этапа было ознакомление испытуемого с методикой представления воображаемых движений, в которой основным было акцентирование внимания на тактильных ощущениях.

Длительность предъявления командных пиктограмм составляла 5 секунд с межстимульным интервалом 3 секунды. В течение записи для каждой ментальной задачи в случайном порядке предъявлялось по 10 стимулов. Успешность освоения методики воображаемых движений определялась по степени десинхронизации сенсомоторного ритма. При уменьшении мощности спектра ЭЭГ (десинхронизации) во время воображения движения на величину более 50 % испытуемый считался успешно освоившим методику представления воображаемых движений.

Испытуемые, успешно освоившие методику воображаемых движений, допускались на второй этап эксперимента, в котором контур нейроинтерфейса дополнялся тактильной и визуальной (в данном исследовании для применения как стандартной обратной связи и ее сравнения с исследуемой – тактильной) обратной связью. В начале сессии испытуемому разъяснялись типы обратных связей, применяемых в эксперименте. В качестве визуальной обратной связи во время записи для каждого типа ментальной задачи помимо пиктограммы предъявлялась вертикальная полоска зеленого цвета от центра фиксационного крестика

до края экрана. Тактильная обратная связь осуществлялась при помощи микровибромоторов (3 В, 12000 об/мин), устанавливаемых на предплечья правой и левой руки, а также сзади на шею для сигнализации об успешном распознавании паттернов ЭЭГ-представления движений правой руки, левой руки и задачи «покой» соответственно. Вибромоторы фиксировались на коже при помощи лент-липучек. Для оповещения испытуемого о правильной классификации состояния подавался вибрационный сигнал длительностью 500 мс. Оповещение производилось в конце команды (через 4,5 секунды после начала предъявления пиктограммы на экране) только в случае ее верного распознавания. Второй этап эксперимента представлял собой всего 12 записей: по 4 записи для каждого типа обратной связи и 4 записи без обратных связей (которые использовались в качестве контроля). Порядок используемого в записи типа обратной связи определялся случайным образом. В каждой записи предъявлялось 30 стимулов (по 10 для каждой ментальной задачи) длительностью по 5 секунд с межстимульным интервалом 3 секунды. При этом фиксировалась точность распознавания команд как отношение правильно распознанных команд к общему числу предъявленных стимулов. Кроме того, для каждой команды вычислялась степень десинхронизации в диапазоне сенсомоторного ритма.

Результаты

Все испытуемые завершили первый этап эксперимента с десинхронизацией выше 50 % при воображении движений. На втором этапе эксперимента были получены оценки точности классификации для разных типов обратных связей. Точность распознавания при классификации трех состояний (движения правой, левой рукой и задача «покой») в контуре ИМК без обратной связи для всех испытуемых превышала случайный уровень (33 % для трех состояний) и была достаточно высокой – (67,8 ± 13,4) % (среднее значение ± стандартное отклонение).

Исследование динамики вероятности верной классификации от номера записи при разных типах ОС (см. рис. 2) показало отсутствие статистически достоверных различий (F (6,24) = 2,281; p = 0,070). Нужно заметить, что субъективные оценки испытуемых говорят о непривычности тактильного типа обратной связи при первой записи. Однако все испытуемые уже ко второй записи смогли приспособиться к данному типу обратной связи, о чем свидетельствует график на рис. 1.

Анализ изменения мощности спектра на индивидуальных частотах мю-ритма испытуемых при воображаемых движениях левой и правой рукой по сравнению с покоем не выявил различий между разными типами обратных связей (для C3 и правой руки: Kruskal-Wallischi-squared = 1,0568, df = 2, p-value = 0,5896, для C4 и левой руки: Kruskal-Wallischi-squared = 2,0938, df = 2, p-value = 0,351). Кроме того, не было выявлено изменений десинхронизации в зависимости от сессии эксперимента. Можно отметить, что в среднем испытуемые демонстрировали достаточно высокий уровень десинхронизации в контралатеральном полушарии во всех экспериментальных сессиях вне зависимости от типа обратной связи (рис. 2, рис. 3).

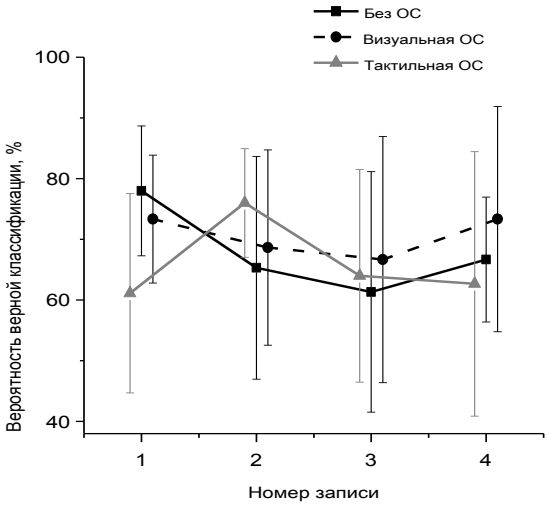


Рис. 1. Изменение точности классификации в зависимости от номера записи для различных вариантов ОС. Отмечено среднее значение ± стандартное отклонение

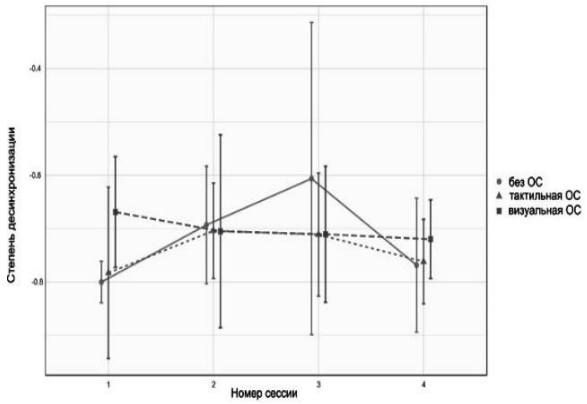


Рис. 2. Изменение степени десинхронизации для электрода C3 для различных видов ОС в зависимости от сессии при воображаемом движении правой рукой. Отмечено среднее значение ± стандартное отклонение

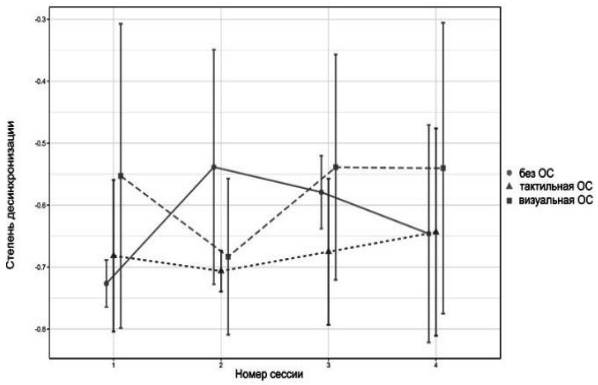


Рис. 3. Изменение степени десинхронизации для электрода C4 для различных видов ОС в зависимости от сессии при воображаемом движении левой рукой. Отмечено среднее значение ± стандартное отклонение

Таким образом, показано, что тактильная обратная связь может быть использована в контуре ИМК на основе представления движения взамен обычно используемой визуальной обратной связи, в связи с тем что оба варианта вносят достоверно не различимый вклад в увеличение точности классификации и, что немаловажно, в десинхронизацию при воображении движения.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 15-19-20053).

Литература

1. *Каплан А.Я., Жигульская Д.Д., Кирьянов Д.А.* Изучение возможности управления отдельными пальцами фантома кисти руки человека в контуре интерфейса «мозг – компьютер» на волне P300 // Вестник Рос. гос. мед. ун-та. 2016. № 2.

2. *Frolov A.A.* [*et al.*] Principles of motor recovery in post-stroke patients using hand exoskeleton controlled by the brain-computer interface based on motor imagery // Neural Network World. 2017. V. 27, № 1. P. 107.

3. *Kotov S.V.* [*et al.*] Rehabilitation of Stroke Patients with a Bioengineered “Brain–Computer Interface with Exoskeleton” System // Neuroscience and Behavioral Physiology. 2016. V. 46, № 5. P. 518–522.

4. *Birbaumer N., Cohen L.G.* Brain–computer interfaces: communication and restoration of movement in paralysis // J. Physiology. 2007. V. 579, № 3. P. 621–636.

5. *Vasilyev A.* [*et al.*] Assessing motor imagery in brain-computer interface training: Psychological and neurophysiological correlates // Neuropsychologia. 2017. V. 97. P. 56–65.

6. *Oldfield R.C.* The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory // Neuropsychologia. 1971. V. 9, № 1. P. 97–113.

7. *Доскин В.А.* [*и др.*] Тест дифференцированной самооценки функционального состояния // Вопросы психологии. 1973. Т. 6. С. 141–145.

Зрительно-моторная координация при чтении текстов как отражение уровня языковой подготовки человека

В.А. Демарева, П.Д. Полякова

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Чтение текста представляет собой последовательность произвольных и непроизвольных саккад и фиксаций. Важная роль принадлежит саккадическим движениям глаз, при которых происходит локализация изображения объекта в фовеальной области. При каждой остановке взора (фиксации) извлекается дискретная информация о зрительной сцене [24]. Многие объективные и субъективные факторы оказывают влияние на скорость визуального анализа, который включает в себя, в частности, зрительно-моторную координацию, восприятие, переключение внимания и лексическую, когнитивную обработку информации [14].

В экспериментальных работах с использованием технологии айтрекинга выявлено множество особенностей работы с текстом. Исследования влияния возраста на зрительно-моторную координацию при чтении показали, что для детей характерны длительные и частые фиксации, низкоамплитудные саккады, регрессивные (возвратные) саккады [13, 22, 25], малый размер перцептивного поля («perceptual span») [25], что корректируется по мере совершенствования навыков чтения [19, 26]. Уменьшение же перцептивного поля вызывает трудности при чтении, что можно наблюдать при дислексии [11].

Также имеются данные о возрастных особенностях диаметра зрачка [21], который, в том числе, регулируется вегетативной нервной системой. Соотношение между симпатическим и парасимпатическим отделами вегетативной нервной системы исследуется с использованием анализа вариабельности ритма сердца (ВРС) [1]. Показано, что сигналы от сердца влияют не только на вегетативные регуляторные центры, но также на высшие центры коры, вовлеченные в эмоциональные и когнитивные циклы, включая таламус, миндалину и кору. Посредством этих путей активность сердца влияет на разные функции мозга [27]. Имеются данные о возрастной динамике ВРС: с 0 до 14 лет происходит увеличение симпатовагусного баланса [17]; с 1 до 6 лет происходит увеличение активности парасимпатической нервной системы, а с 6 до 15 – снижение [16].

Настоящее исследование направлено на изучение зрительно-моторной координации при чтении текстов учениками начальной школы и студентами на родном и иностранном языках. Предполагается, что уровень языкового опыта человека (как в отношении родного, так и в отношении иностранного языка) проявляется в зрительно-моторной координации при чтении текстов.

Материалы и методы

Исследование предполагало следующие этапы:

1. *Оценка уровня знания английского языка у студентов* с помощью методики Placement test (http://oxfordklass.com/placement–test/) по алгоритму, изложенному в [3]. В исследовании приняли участие только те 5 добровольцев, у которых диагностирован уровень элементарного владения английским языком (Elementary).

2а. *Запись траектории движения взора при работе с текстами на родном и иностранном языке у студентов.*

2б. *Запись траектории движения взора и ВРС при работе с текстами на родном языке у учеников начальной школы.*

Применялась технология айтрекинга по методу видеокулографии [5]. В работе использована установка SMI iView X Hi-Speed 1250, регистрирующая движения глаз в инфракрасном диапазоне излучения, определяющая направление взгляда, основываясь на векторе смещения между центрами зрачка и роговичного блика, – так называемая система «pupil-corneal reflex». Добровольцам предлагалось прочитать 2 текста на русском языке (для всей выборки) и 2 текста на английском языке (только для студентов), имеющие одинаковые пространственные и частотные характеристики.

Для сбора данных о режимах вегетативной регуляции при чтении текстов проводилось непрерывное измерение сердечного ритма с помощью технологии событийно-связанной телеметрии [6, 7, 8]. Технология обеспечивает мониторинг и анализ динамики вариабельности ритма сердца (ВРС) с учетом событийного контекста: последовательность временных интервалов между ударами сердца (ритмограмма) регистрируется нагрудными пластиковыми электродами; первичная обработка сигнала и трансляция данных на смартфон осуществляется сенсорной платформой Zephyr HxMTM Smart Heart Rate Monitor (HxM, Zephyr Technology) по каналу Bluetooth; специализированное приложение «Stress monitor» в ОС Android (версии не ниже 4.4) выполняет функцию монитора реального времени и обеспечивает передачу данных на облачный сервер; визуализация ритмограмм, спектральный анализ и детектирование стресс-эпизодов реализуется в специализированном интернет-сервисе «Stress monitor» (cogni-nn.ru) [4].

Персонифицированный анализ динамики вегетативной регуляции проведен на основе спектральных показателей вариабельности сердечного ритма. Методом динамического фурье-анализа с окном 100 с и шагом 10 с вычислялись следующие показатели: суммарная мощность спектра вариабельности сердечного ритма – TP ($мс^2$), характе-

ризующая адаптационный потенциал; мощность спектра в области частот от 0,04 до 0,15 Гц – LF (мс^2), характеризующая активность симпатической нервной системы по модуляции сердечного ритма; мощность спектра в области частот от 0,15 до 0,4 Гц – HF (мс^2), характеризующая активность парасимпатической нервной системы; отношение LF к HF – индекс вегетативного баланса, характеризующий напряжение регуляторных систем [23].

3. *Сопоставление амплитудно-временных характеристик движения взора у студентов и учеников начальной школы при работе с текстами на родном и иностранном языках* с использованием *U*-критерия Манна – Уитни и *t*-критерия Вилкоксона. Из анализа исключались возвратные саккады, саккады, связанные с переходом между строк, фиксации, длительность которых отличалась более чем на 2,5 отклонения от среднего [20]. Для анализа связи диаметра зрачка и показателей ВРС использовался критерий ранговой корреляции Спирмена.

В выборку исследования вошли: 5 учеников начальной школы (7–9 лет), 5 студентов (19–22 года) с элементарным уровнем знания английского языка. Все добровольцы удовлетворяли критерию отсутствия неврологических и психиатрических патологий, трудностей чтения, аномалий глазного аппарата.

Результаты

При сопоставлении амплитудно-временных характеристик движения взора у студентов при чтении текстов на родном и иностранном языке было выявлено, что амплитуда саккад выше, а длительность фиксаций меньше при чтении родного текста, чем иностранного ($p < 0,05$). Это согласуется с маркерами субъективной сложности процесса чтения [2]. Также оказалось, что амплитуда саккад выше при чтении текста на родном языке студентами, чем учениками начальной школы ($p < 0,05$) – рис. 1. Разницы в показателях зрительно-моторной активности при чтении студентами текста на иностранном языке и школьниками текста на родном языке выявлено не было.

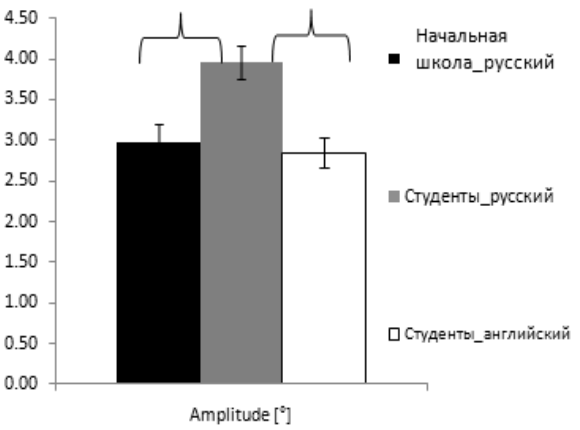


Рис. 1. Средние значения амплитуды саккад у учеников начальной школы и у студентов в разных контекстах

При сопоставлении диаметра зрачка при чтении текста на родном языке у студентов и учеников начальной школы было выявлено, что данный показатель значительно выше у школьников ($p < 0,001$) – рис. 2.

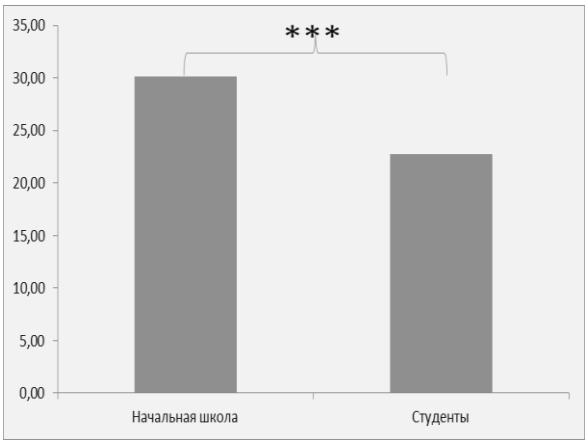


Рис. 2. Средние значения диаметра зрачка у студентов и учеников младшей школы при чтении текстов на родном языке

Оказалось, что чем выше активность парасимпатической нервной системы и общая мощность спектра ВРС и ниже индекс вегетативного баланса, тем меньше диаметр зрачка (таблица).

Связь спектральных показателей ВРС и диаметра зрачка при чтении текстов на родном языке у учеников начальной школы

	LF	HF	TP	LF/HF
HF	0,743			
TP	0,765	0,888		
LF/HF	–	–0,617	–0,479	
Диаметр зрачка	–	–0,443	–0,510	0,440

Таким образом, увеличение диаметра зрачка у учеников начальной школы при чтении текста на родном языке связано с увеличением доминирования симпатического контура регуляции над парасимпатическим ($R = 0,44$, $p < 0,05$).

Обсуждение

Ранее показано, что уровень компетенции в иностранном языке может быть оценен в пространстве параметров айтрекинга по степени сходства зрительно-моторной координации при работе с текстами на родном и иностранном языках [15]. По результатам настоящего исследования, одинаковые значения амплитуды саккад и длительности фиксаций при работе детьми с текстами на родном языке и взрослыми – на иностранном языке свидетельствуют в пользу предположения о том, что размер перцептивного поля зависит от уровня языковой подготовки человека.

Большее количество высокоамплитудных саккад у студентов при чтении текста на родном языке, чем у студентов при чтении на иностранном языке и у детей при чтении на родном языке, со-

гласуется с заключениями McConkie et al. [22] и Blythe et al. [10] о развитии навыка чтения с возрастом, но дополняет имеющиеся знания тем, что навык чтения зависит не столько от возраста, сколько от развития моделей работы с текстом в условиях определенной языковой среды. Это также согласуется с положением о развитии перцептивного поля при работе с текстами по мере развития языковых навыков [19, 26].

Известно, что субъективная сложность приводит в том числе к такой физиологической реакции, как расширение зрачка [9, 28], диаметр которого имеет тесную связь с уровнем активации симпатической нервной системы [12]. Следовательно, можно полагать, что субъективная сложность процесса чтения может приводить к активации симпатической нервной системы.

В нашем исследовании показано, что у учеников начальной школы диаметр зрачка значительно выше, чем у студентов при чтении текстов на родном языке. Это, во-первых, может быть связано с большей субъективной сложностью чтения для детей, во-вторых, с возрастными особенностями созревания вегетативной нервной системы: снижение активности парасимпатической нервной системы и увеличение индекса симпатовагусного баланса с 6 лет и до окончания пубертата [16, 29]. Поскольку нами было выявлено, что увеличение диаметра зрачка у детей связано с активацией симпатической нервной системы, то можно полагать, что причиной большего диаметра зрачка у детей, чем у студентов, являлась именно субъективная сложность процесса работы с текстом (которая обусловлена неразвитостью модели работы с текстами на родном языке).

Для лучшего понимания специфики визуального анализа у детей необходимо проведение исследований не только чтения, но и визуальных проб, в которых не задействован лингвистический компонент (например, слежение за движущейся точкой [18]).

Выводы:

1. Зрительно-моторная координация при чтении текстов отражает уровень компетенции человека как в родном, так и в иностранном языке.

2. Субъективная сложность процесса чтения проявляется в уменьшении амплитуды саккад и увеличении диаметра зрачка, согласованном с активацией симпатической нервной системы.

Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 15–36–01364) и РГНФ (проект 15–06–10894).

Литература

1. *Баевский, Р.М.* [*и др.*] Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем: (часть 1) // Вестник аритмологии. 2001. №. 24. С. 65–87.

2. *Величковский, Б.М.* Когнитивная наука: Основы психологии познания. В 2 т. М. : Смысл : Академия, 2006.

3. *Демарева, В.А.* [*и др.*] Влияние частотности слов на распределение фиксаций при чтении текстов на русском и английском языке у студентов с разным уровнем владения английским языком // Психологические исследования. 2015. Т. 8, № 43. С. 8.

4. *Еремин, Е.В.* [*и др.*] Веб-сервис для визуализации и хранения результатов измерения сердечного ритма : свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621202 от 26.08.2014.

5. *Подладчикова, Л.Н.* [*и др.*] Современные представления о механизмах зрительного внимания. Ростов н/Д : КИБИ МЕДИА ЦЕНТР ЮФУ, 2017. 184 с.

6. *Полевая, С.А.* [*и др.*] Разработка технологии событийно-связанной телеметрии для исследования когнитивных функций // XVIII Междунар. науч.-техн. конференция «Нейроинформатика-2016» : Сб. науч. тр. М. : НИЯУ МИФИ, 2016. Ч. 1. С. 34–44.

7. *Полевая, С.А.* [*и др.*] Система определения функционального состояния группы людей : патент РФ на полезную модель № 129680 от 27.06.2013.

8. *Полевая, С.А.* [*и др.*] Система определения функционального состояния группы людей с обратной связью : патент РФ на полезную модель № 129681 от 27.06.2013.

9. *Beatty, J., Lucero-Wagoner, B.* The pupillary system // *Cacioppo J.T., Tassinary L.G., Berntson G.G.* (Eds.). Handbook of psychophysiology. 2nd ed. New York : Cambridge University Press, 2000. P. 142–162.

10. *Blythe, H.I.* [*et al.*] The binocular coordination of eye movements during reading in children and adults // Vision Research. 2006. V. 4622. P. 3898–3908.

11. *Bosse, M.L., Tainturier, M.J., Valdois, S.* Developmental dyslexia: The visual attention span deficit hypothesis // Cognition. 2007. V. 104, № 2. P. 198–230.

12. *Bradley, M.* [*et al.*] The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation // Psychophysiology. 2008. V. 45, № 4. P. 602–607.

13. *Buswell, G.* Fundamental reading habits: A study of their development Chicago : University of Chicago Press, 1992.

14. *Dambacher, M.* [*et al.*] Evidence for direct control of eye movements during reading // J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform. 2013. V. 39, № 5. P. 1468–1484.

15. *Demareva, V.A., Polevaya, S.A.* Searching for psychophysiological markers of foreign language proficiency: Evidence from eye tracking // International Journal of Psychophysiology. 2012. V. 85, № 3. P. 392.

16. *Goto, M.* [*et al.*] Analysis of heart rate variability demonstrates effects of development on vagal modulation of heart rate in healthy children // J. Pediatr. 1997. V. 130, № 5. P. 725–729.

17. *Kazuma, N.* [*et al.*] Heart rate variability in normotensive healthy children with aging // Clin. Exp. Hypertens. 2002. V. 24, № 1/2. P. 83–89.

18. *Kirkby, J.A.* [*et al.*] Binocular coordination during scanning of simple dot stimuli // Vision Research. 2010. V. 502. P. 171–180.

19. *Levy-Schoen, A., O'Regan, J.* The control of eye movements in reading // Processing of Visible Language / Kolers H., Wrolstand M.E. (Eds.). N. Y. ; London : Plenum Press, 1979. P. 7–36.

20. *Liversedge, S.P.* [*et al.*] Universality in Eye Movements and Reading: a Trilingual Investigation // Cognition. 2016. V. 147. P. 1–20.

21. *MacLachlan, C., Howland, H.C.* Normal values and standard deviations for pupil diameter and interpupillary distance in subjects aged 1 month to 19 years // Ophthalmic Physiol. Opt. 2002. V. 22, № 3. P. 175–182.

22. *McConkie, G.W* [*et al.*] Children's eye movements during reading // Vision and visual dyslexia / J. F. Stein (Ed.). London : Macmillan, 1991. P. 251–262.

23. *McCraty, R., Shaffer, F.* Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity, and Health risk // Glob. Adv. Health Med. 2015. V. 4, № 1. P. 46–61.

24. *Paradiso, M.A.* [*et al.*] Eye movements reset visual perception // Journal of Vision. 2012. V. 12/13, № 11. P. 1–14.

25. *Rayner, K.* Eye movements and the perceptual span in beginning and skilled readers // Journal of Experimental Child Psychology. 1986. V. 412. P. 211–236.

26. *Rayner, K.* Eye movements in reading and information processing: 20 years of research // Psychological Bulletin. 1998. V. 1243. P. 372–422.

27. *Thayer, J.F.* [*et al.*] Heart rate variability, prefrontal neural function, and cognitive performance: the neurovisceral integration perspective on self–regulation, adaptation, and health // Ann. Behav. Med. 2009. V. 37, № 2. P. 141–153.

28. *van Steenbergen, H., Band, G.P.* Pupil dilation in the Simon task as a marker of conflict processing // Frontiers in Human Neuroscience. 2013. V. 7. P. 215.

29. *Zadovna, E.* [*et al.*] The Development of LF/HF Ratio and its Dependence on the Mean Heart Rate in Children and Adolescents // Computing in Cardiology. 2015. V. 42. P. 1045–1048

Проблематика оценки аспекта осознанности «наблюдение»

Е.А. Дорошева[1,2], А.М. Голубев[1]

[1]Новосибирский государственный университет
drew719@mail.ru
[2]Новосибирский государственный медицинский университет
elena.dorosheva@mail.ru

В последнее время в психологических исследованиях все больше возрастает интерес к такой психологической характеристике, как Mindfulness, что в различных российских источниках переводится как «осознанность», «полнота сознания», «внимательность», «бдительность», «холистическое настоящее», «присутствующее настоящее». Далее мы будем использовать термин «осознанность» как наиболее близкий, по нашему мнению, к сути рассматриваемого конструкта. Представление об осознанности пришло в западную психологию из буддизма в связи с попытками найти средство для повышения психологического благополучия личности. Mindfulness рассматривается как свойство внимания, восприятия, сознания, предполагающее специфическую регуляцию аффективных и когнитивных процессов. Полагают, что этот тип регуляции способствует оптимальному психическому функционированию. В двухкомпонентной модели Mindfulness, предложенной С.Р. Бишоп и др., первый компонент представляет собой саморегуляцию внимания – направление его на текущие внутренние и внешние стимулы как на уровне восприятия, так и на уровне контроля действий. Второй компонент представляет собой набор механизмов, позволяющих освободить ресурсы внимания от параллельных процессов обработки информации. Это нереагирующее отношение к своему опыту – то есть восприятие внешних и внутренних стимулов с возможностью отсрочки процессов вторичной переработки информации (ассоциативные мысленные потоки, включение цепочек эмоциональных реакций, механизмов регуляции эмоций, например, таких как отрицание или подавление их и т. д.). Воздержание от оценки своего внутреннего опыта, при котором каждая возникающая мысль, чувство, ощущение принимается и признается такой(-им) как есть. Умение вербально описывать внутренний и внешний опыт, что делает его осознаваемым, позволяет его интегрировать без «зависания» в нем.

Необходимо отметить, что конструкт осознанности не до конца операционализирован. Различные авторы выделяют разный набор его компонентов, а измеряющие его методики ориентированы на отличающиеся аспекты осознанности. Кроме того, при измерении осознанности возникает ряд проблем, связанных с тем, что содержание Mindfulness не понятно человеку, не имеющему практики и не знакомому с теорией медитации. Некоторые авторы для решения этой проблемы убирают пункты, труднопонимаемые респондентами – специальную терминологию, а также пункты, предполагающие очень высокие уровни данного свойства [3]. Кроме того, осознанность измеряется через ее отсутствие, более понятное человеку западной культуры, – mindlessness (невовлеченность в происходящее вокруг, снижение внимания ко внутренним и внешним стимулам, действия на автомате). Однако появляется другая проблема – что именно в таком случае измеряется?

С целью систематизации данных, полученных при тестировании различными методиками на осознанность, и выделения ее основных аспектов сотрудники университета Кентуки провели исследование с использованием таких известных опросников, как MAAS Брауна и Риана, Фрайбурского опросника осознанности FMI, Кентукского опросника навыков осознанности KIMS, Шкалы когнитивной и аффективной осознанности CAMS и MQ Чадвика и др. Применив факторный анализ данных, полученных на группе респондентов, исследователи выделили пять основных факторов – аспектов осознанности: наблюдение за внутренними и внешними стимулами, способность к вербальному описанию внутреннего опыта (чувств, мыслей, ощущений), осознанную деятельность (в противоположность автоматическим действиям), безоценочное отношение к внутреннему опыту и нереагирование на внутренний опыт. На основе данной модели был разработан пятифакторный опросник FFMQ [2].

Дальнейшие исследования выявили ряд особенностей при использовании данного опросника. В частности, это неоднозначное понимание пунктов шкалы «безоценочное отношение к внутреннему опыту» – часть респондентов приравнивает принятие негативных эмоций или событий к их одобрению [4]. Пункты шкалы «нереагирование на внутренний опыт» одними респондентами воспринимаются как возможность блокады поведенческой реакции, другими – эмоциональной реакции, а третьи вообще затрудняются с ответом. (Примеры пунктов: «В сложных ситуациях я могу сделать паузу и не реагировать немедленно» / «In difficult situations, I can pause without immediately reacting» или «Я осознаю свои чувства и эмоции, но необязательно на них реагирую» / «I perceive my feelings and emotions without having to react to them».)

Шкала «наблюдение», в которую заложены представления о способности к концентрации внимания на внешних и внутренних стимулах, дает (согласно результатам предварительных исследований на общей выборке) противоречивые связи с другими психологическими конструктами, существенно отличающиеся от связей других компонентов осознанности. Как указывают некоторые авторы, пятифакторная модель осознанности наи-

лучшим образом воспроизводится на выборке респондентов с опытом медитативных практик. Для респондентов без такого опыта предлагается четырехфакторная модель осознанности, не включающая шкалу «наблюдение» [2]. Шкала «наблюдение» для общей выборки, вероятно, может иметь повышенные значения и при отсутствии осознанности, отражая иные психологические характеристики (например, тревожность как повышенное внимание к различным стимулам). Настоящее исследование направлено на изучение особенностей аспекта осознанности «наблюдение».

Этапы и методы исследования

На первом этапе мы проводили анализ пунктов, входящих в шкалу «наблюдение», методом главных компонент и разделили этот показатель на две подшкалы. В качестве показателя осознанности мы рассматривали сумму по трем шкалам пятифакторного опросника: описание внутреннего опыта, осознанная деятельность и безоценочное отношение (суммирование проведено для простоты анализа, шкалы выбраны как дающие наиболее согласованные результаты в исследованиях и содержащие пункты, более однозначно понимаемые респондентами). Далее с помощью рангового корреляционного анализа по Спирмену выявляли взаимосвязи показателей осознанности, шкалы «наблюдение» в целом и выделенных нами ее подшкал с различными аспектами психологического благополучия и неблагополучия личности (депрессивная симптоматика, тревожность). Использовали Оксфордский опросник счастья, шкалу благополучия К. Рифф, опросник удовлетворенности жизнью SWLS Э. Динера, опросник депрессии А. Бека, скрининговый опросник депрессии PHQ-9, опросник тревожности Ч. Спилбергера. Рассматривали взаимосвязи с конструктами, описывающими разные аспекты саморегуляции эмоций, мышления, поведения и теоретически связанными с осознанностью. Для этого использовали методики, направленные на описание регуляции эмоций: шкалу руминации С. Нолен-Хоэксемы, методику изучения эмоциональной регуляции Д. Гросса, эмоционального интеллекта: ЭмИи Д.В. Люсина, опросник Н. Холла; алекситимии: модификации Торонтской алекситимической шкалы – TAS26, TAS20; рефлексии: методику дифференциальной диагностики рефлексии Д.А. Леонтьева; копинг-стратегий: опросник «Способы совладающего поведения» Р. Лазаруса; SACS «Стратегии преодоления стрессовых ситуаций» С. Хобфолла. На третьем этапе мы сформировали подгруппы испытуемых по двум основаниям: выраженность показателя по шкале «наблюдение» (фактор 1, два уровня: относительно низкие и высокие значения) и по осознанности (фактор 2, два уровня: высокие и низкие значения). Мы применили двухфакторный дисперсионный анализ для выявления показателей со значимым взаимодействием факторов «наблюдение» и «осознанность». Всего выборку составило 484 человека (304 женщины, 180 мужчин) в возрасте от 21 до 60 лет.

Результаты

Анализ пунктов шкалы «наблюдение» методом главных компонент с вращением варимакс позволил выделить (на основании собственных значений, превышающих 1) две четко выраженные компоненты. В первую вошли пункты 1, 6 и 36: «Когда я иду, я сознательно обращаю внимание на движения моего тела», «Когда я принимаю ванну или душ, я прислушиваюсь к ощущениям воды на моем теле», «Я обращаю внимание на то, как мои эмоции влияют на мои мысли или на мое поведение». Во вторую – 20, 26 и 31: «Я замечаю окружающие меня звуки, такие как тиканье часов, щебет птиц или шум проезжающих машин», «Я обращаю внимание на звуки и ароматы», «Я замечаю визуальные предметы в природе и искусстве, такие как: цвета, формы, текстуры, игра цвета и теней». Первый фактор описывает, таким образом, концентрацию внимания на внутренних стимулах, второй – на внешних. Два пункта не попали с достаточным весом ни в один из факторов: «Я замечаю, как еда, напитки влияют на мои мысли, эмоции, телесные ощущения», «Я обращаю внимание на свои ощущения, такие как ветер в моих волосах или солнце на моем лице». Для каждого испытуемого были рассчитаны значения по двум подшкалам, согласно выделенным факторам: «наблюдение / внутренние стимулы» (сумма по пунктам 1, 6, 36) и «наблюдение / внешние стимулы» (сумма по пунктам 20, 26, 31) .

Взаимосвязи осознанности и наблюдения с психологическим благополучием. Показатель осознанности имел высокозначимые прямые корреляционные связи с показателями психологического благополучия: по Оксфордскому опроснику счастья (r = 0,59, p < 0,01), суммарному показателю опросника К. Рифф (r = 0,63, p < 0,01), SWLS (r = = 0,53, p < 0,01). Также выявлены высокозначимые обратные связи с показателями депрессивных симптомов и тревожности: с уровнем депрессии по опроснику А. Бека (r = –0,45, p < 0,01), по PHQ-9 (r = –0,53, p < 0,01), с личностной тревожностью (r = –0,53, p < 0,01) и ситуативной тревожностью (r = –0,42, p < 0,01) по опроснику Ч.Д. Спилбергера. Полученный результат соответствует общим представлениям о феномене осознанности и согласуется с данными аналогичных исследований [1, 2]. Однако для шкалы «наблюдение» не были получены значимые связи с показателями благополучия и неблагополучия, за исключением слабой положительной корреляции со шкалой Оксфордского опросника счастья (r = 0,16, p < 0,05). Подшкалы «наблюдения» также не показали обилие связей с рассматриваемыми конструктами. Так, показатели подшкалы, описывающей внимание к внешним стимулам, были положительно связаны с субъективным благополучием (r = 0,17, p < 0,01, Оксфордский опросник счастья), с позитивными отношениями с окружающими как фактором благополучия (r = 0,22, p < 0,01, опросник К. Рифф). Подшкала, описывающая внимание к внутренним стимулам, показала единственную и парадоксальную прямую взаимосвязь с наличием аффективно-

когнитивной депрессивной симптоматики (r = 0,21, p < 0,05).

Взаимосвязи осознанности и наблюдения с эмоциональным интеллектом и алекситимией. Показатель осознанности имел положительную связь с общим эмоциональным интеллектом (r = = 0,37, p < 0,01) и другими шкалами опросника ЭмИн. Наиболее тесная связь наблюдалась с показателями, отражающими способность к пониманию своих эмоций. Для шкалы «наблюдение» и ее подшкал также были выявлены связи с различными аспектами эмоционального интеллекта, но картина этих связей была несколько отличной и внутренне противоречивой. С общим уровнем эмоционального интеллекта коррелировала только подшкала «наблюдение / внешние стимулы» (r = 0,26, p < 0,05). В то же время подшкала «наблюдение / внутренние стимулы» имела отрицательные связи со шкалами «управление своими эмоциями» опросника Н. Холла (r = –0,26, p < 0,05) и «внутриличностный эмоциональный интеллект» опросника Д.В. Люсина (r = –0,22, p < 0,05). Следует отметить, что с этими аспектами эмоционального интеллекта показатель осознанности имел, наоборот, положительные связи (r = 0,25, p < 0,05 и r = 0,42, p < 0,01 соответственно). Шкала «наблюдение» и обе подшкалы имели положительные значимые связи с эмоциональной осведомленностью и эмпатией (опросник Н. Холла). Связей показателя осознанности с аналогичными шкалами не выявлено. В целом подшкала «наблюдение / внешние стимулы» положительно связана со способностью распознавать чужие эмоции, а наблюдение за внутренними стимулами не способствует пониманию своих эмоций и управлению ими (выявлена отрицательная связь).

С использованием TAS26 выявлена высокозначимая отрицательная связь осознанности и алекситимии (r = –0,70, p < 0,01); отрицательная, но более слабая связь с алекситимией показана и для шкалы «наблюдение» (r = –0,32, p < 0,05), а также для подшкалы, описывающей внимание к внешним стимулам (r = –0,31, p < 0,05). При этом взаимосвязь подшкалы «наблюдение / внутренние стимулы» с алекситимией не выявлена. Таким образом, чем выше осознанность и чем выше внимание к внешним стимулам, тем лучше человек вербализирует свои эмоции, тем меньше склонен путать их с телесными ощущениями; повышение же внимания к своим телесным ощущениям и эмоциям не способствует их лучшему распознаванию (что соответствует и данным, полученным при изучении взаимосвязей с эмоциональным интеллектом). Для внимания к внутренним стимулам (r = –0,40, p < 0,01) и для наблюдения в целом показаны значимые отрицательные связи с компонентом алекситимии – внешне-ориентированным (экстернальным) мышлением – стремлением фокусироваться на внешних характеристиках ситуации в ущерб ее внутренним оценкам, переживаниям (TAS20).

Взаимосвязи осознанности и наблюдения со стратегиями эмоциональной регуляции. Из рассмотренных стратегий эмоциональной регуляции осознанность отрицательно связана с описываемыми как неадаптивные способами: подавлением мыслей, вызывающих неприятные эмоции (r = = –0,57, p < 0,01), руминацией (r = –0,61, p < 0,01), подавлением эмоциональной экспрессии в межличностных контактах (r = –0,24, p < 0,05), прямо связана с адаптивной стратегией когнитивной переоценки (r = 0,28, p < 0,01).

Наблюдение, в отличие от трех рассмотренных компонентов осознанности, связано только с руминациями, причем эта связь прямая (r = 0,31, p < 0,01). Она формируется только за счет наблюдения, ориентированного на внутренние стимулы (r = 0,31, p < 0,01). «Пережевывание» прошлых негативных ситуаций и внимание к своим телесным ощущениям, переживаниям в данном случае могут быть пересекающимися способами уклониться от актуальных внешних стимулов, контактов, проблемных ситуаций. Повышение внимания к внутреннему опыту может также отражать увеличение сенситивности, провоцирующей погружение в переживания. Это хорошо согласуется с выявленной прямой корреляцией подшкалы «наблюдение / внутренние стимулы» с когнитивно-аффективной симптоматикой по опроснику депрессии А. Бека.

Взаимосвязи осознанности и наблюдения с рефлексией. Взаимосвязи осознанности с системной рефлексией не выявлены, показаны обратные связи ее с интроспекцией – самокопанием (r = = –0,42, p < 0,01), с квазирефлексией – уходом в размышления далекие от актуальной ситуации (r = –0,53, p < 0,01). В то же время шкала «наблюдение» имела прямую связь с системной рефлексией – самодистанцированием и взглядом на себя со стороны (r = 0,30, p < 0,05), а также квазирефлексией (r = 0,45, p < 0,01). Подшкала «наблюдение / внутренние стимулы» прямо связана с интроспекцией и квазирефлексией (r = 0,33, p < 0,05 в обоих случаях). Подшкала «наблюдение / внешние стимулы» прямо связана с квазирефлексией (r = 0,34, p < 0,05). Таким образом, мы видим, что связи шкалы «наблюдения» и ее подшкал с компонентами рефлексии и связи осознанности с рефлексией разнонаправлены. Осознанность связана с отсутствием неадаптивных форм рефлексии, тогда как компоненты наблюдения прямо связаны со всеми формами рефлексии.

Взаимосвязи осознанности и наблюдения с копинг-стратегиями. Исследование связей изучаемых параметров с показателями копинг-стратегий позволило обнаружить, что осознанность и наблюдение также имеют отличающиеся корреляции. Так, осознанность обратно связана со стратегиями «избегание» (r = –0,53, p < 0,01), «дистанцирование» (r = –0,22, p < 0,05), «принятие ответственности» (r = –0,40, p < 0,01) опросника Р. Лазаруса, «агрессивные действия» SACS (r = –0,32, p < 0,05) и положительно – с «планированием решения проблемы» (r = 0,28, p < 0,01) опросника Р. Лазаруса, «ассертивными действиями» (r = 0,56, p < 0,01) опросника С. Хобфолла. Шкала «наблюдение» и ее подшкала «наблюдение / внутренние

стимулы» прямо связаны со стратегиями «положительная переоценка» Р. Лазаруса (r = 0,29, p < 0,01 для шкалы; и r = 0,32, p < 0,01 для подшкалы), «импульсивные действия» SACS (r = 0,42, p < 0,01 для шкалы и r = 0,27, p < 0,05 для подшкалы). Между подшкалой «наблюдение / внешние стимулы» и различными копингами значимых связей обнаружено не было. Таким образом, большая выраженность осознанности предполагает использование стратегий, направленных на решение проблемы. Для шкалы «наблюдение» такой тенденции не наблюдается.

Взаимодействие факторов осознанности и наблюдения. С помощью двухфакторного дисперсионного анализа выявлены значимые взаимодействия факторов «наблюдение» и «осознанность» по шкалам: «поиск социальной поддержки» (F = 5,42; p < 0,05) и «когнитивная переоценка» (F = 4,17; p < 0,05) опросника Р. Лазаруса, «поиск социальной поддержки» опросника SACS (F = 5,08; p < 0,05), «алекситимия» TAS26 (F = 6,45; p < 0,05), «руминации» (F = 4,01; p < 0,05), когнитивно-аффективная субшкала опросника А. Бека (F = = 4,45; p < 0,05) и «подавление эмоциональной экспрессии» опросника эмоциональной регуляции (F = 5,92; p < 0,05).

В целом двухфакторный дисперсионный анализ показывает неоднозначные результаты взаимодействия наблюдения и осознанности. Высокий уровень выраженности наблюдения при низкой осознанности сочетается с более высоким уровнем руминаций, подавления эмоциональной экспрессии в межличностных контактах и когнитивно-аффективной депрессивной симптоматики. Концентрация внимания на внутренних стимулах при низком уровне осознанности играет отрицательную роль, возможно, способствуя увеличению погружения в навязчивые негативные переживания, избеганию эмоциональной вовлеченности в межличностных контактах.

В то же время при высокой осознанности высокий уровень наблюдения сочетается с более низкой алекситимией. При остальных сочетаниях факторов уровень алекситимии относительно высок. Таким образом, для хорошего распознавания своих и чужих эмоций и их вербализации важны все компоненты осознанности: внимание к внешним и внутренним стимулам, умение описывать свои впечатления и безоценочное к ним отношение.

Низкий уровень наблюдения при высокой осознанности сочетается с меньшей склонностью использовать такие копинг-стратегии, как поиск социальной поддержки и позитивная переоценка ситуации.

Таким образом, наблюдение, описываемое как компонент осознанности, дает связи с различными психологическими конструктами, существенно отличающиеся от взаимосвязей прочих составляющих осознанности. Кроме того, оно включает два четко выделяемых компонента: наблюдение за внутренними стимулами (телесными ощущениями, эмоциями, мыслями) и наблюдение за внешними стимулами. Первый компонент демонстрирует прямые связи с негативными аспектами психического функционирования и может быть следствием повышенной чувствительности или следствием тенденций к негативной рефлексии. Второй компонент большей частью демонстрирует связи, подобные наблюдаемым для осознанности, но с меньшим числом рассмотренных психологических характеристик и более слабые.

Литература

1. *Голубев А.М.* Природа полноты сознания : адаптация опросника внимательности и осознанности MAAS // Вестник НГУ. Психология. 2012. Т. 6, вып. 2. С. 44–51.

2. *Baer R.A., Smith G.T., Hopkins J., Krietemeyer J., Toney L.* Using Self-Report Assessment Methods to Explore Facets of Mindfulness // Assessment. 2006. V. 13, № 1. P. 27–45.

3. *Brown K.W., Ryan R.M.* The Benefits of Being Present: Mindfulness and Its Role in Psychological Well-Being // Journal of Personality and Social Psychology. 2003. V. 84, № 4. P. 822–848.

4. *Segal Z.V., Williams J.M.G., Teasdale J.D.* Mindfulness-based Cognitive Therapy for Depression: a New Approach to Preventing Relapse. New York, 2002.

Хаотическая динамика параметров электроэнцефалограмм

В.В. Еськов, Д.В. Горбунов, Л.Г. Клюс, И.Б. Булатов

Сургутский государственный университет

Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) активно используется в анализе работы головного мозга при различных поражениях центральной нервной системы, например при нейроинфекциях (полиомиелит и др.), менингитах, энцефалитах и др. По результатам ЭЭГ можно оценить степень поражения головного мозга вследствие различных причин и уточнить конкретное место, подвергшееся повреждению. Электроэнцефалограмма отражает функциональное состояние структур головного мозга, например, в условиях сна, бодрствования, активной умственной или физической работы и т. д. Информационная устойчивость ЭЭГ традиционно основывается на статистических параметрах выборок ЭЭГ (спектральных плотностей сигнала – СПС), автокорреляций $A(t)$ и т. д.).

Суперпозиция активности многих нейронов, которые хаотически создают суммарную биоэлектрическую активность, проявляется в виде интегральной суммарной активности, которая все-таки хаотически изменяет свою характеристику не только в виде выборок, но и в виде автокорреляций – $A(t)$ и СПС. Из-за отсутствия жесткой синхронизации эти выборки можно считать особой хаотической функцией, которая может быть описана в рамках нового подхода путем расчета параметров квазиаттракторов (КА) вектора состояния системы $x(t)$. Генерация биопотенциалов мозга дает некоторую закономерность именно в рамках параметров квазиаттракторов, так как основные стохастические функции (характеристик) демонстрируют непрерывные изменения [5]. Одновременно возникает вопрос о целесообразности использования стохастики в описании ЭЭГ. Можно ли при этом предложить другие подходы?

Метод расчета квазиаттрактора ЭЭГ

Для анализа в рамках нового подхода были выбраны данные, которые были получены с помощью электроэнцефалографа от здорового человека и человека больного эпилепсией. Записи ЭЭГ мозга обрабатывались программным комплексом для формирования вектора $x = (x_1, x_2, x_3)^T$, где $x_1 = x(t)$ – динамика абсолютного значения биопотенциалов мозга на некотором интервале времени Δt, x_2 – скорость изменения x_1, т. е. $x_2 = dx_1/dt$, а x_3 – ускорение изменения x_1, т. е. $x_3 = dx_2/dt$. На основе полученного вектора $x(t) = (x_1, x_2, x_3)^T$ строились КА динамики поведения $x(t)$ и определялись объемы полученных квазиаттракторов V_G по формуле $V_G^{\max} \geq \Delta x_1 \cdot \Delta x_2 \cdot \Delta x_3 \geq V_G^{\min}$ [1–5], где Δx_1 – вариационный размах величины биопотенциала, Δx_2 – размах для его скорости изменения, а Δx_3 – размах для ускорения изменения биопотенциалов.

В итоге анализ ЭЭГ испытуемых при воздействии различных внешних факторов (без фотостимуляции и при фотостимуляции) проводился на основе сравнения площади КА в виде S или объема КА V_G, а также энтропии Шеннона E. В этой связи на основе анализа значений энтропии Шеннона E, где E определяется по формуле $E(x) = -\sum_{i=1}^{n} p(i)\log_2 p(i)$, где p – функция вероятности, нами производилось сравнение значений E с особенностями функциональных состояний испытуемых. Отметим, что энтропийный подход широко используется в медицине. ЭЭГ фиксировались при фотостимуляции и без фотостимуляции у здорового и больного эпилепсией человека. Внешний вид квазиаттракторов здорового человека и больного (эпилепсия) представлена на рисунке.

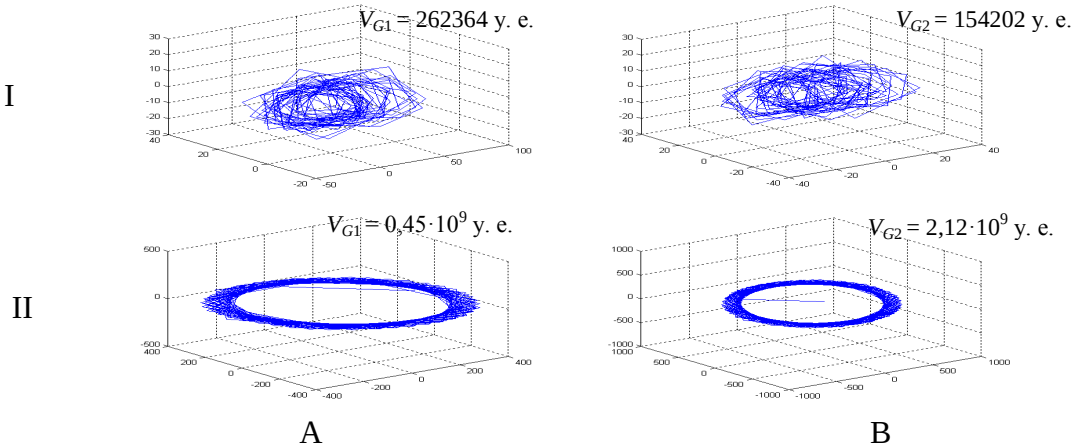


Рис. Фазовые портреты движения вектора состояния ($x = (x_1, x_2, x_3)^T$) ЭЭГ условно здорового испытуемого в период релаксации (спокойное состояние), площадь квазиаттрактора $V_{G1} = 262364$ у. е. (I-A), и при фотостимуляции $V_{G2} = 154202$ у. е. (I-B), а также человека с очаговой эпилепсией в период релаксации (спокойное состояние), $V_{G3} = 0{,}45 \cdot 10^9$ у. е. (II-A), и при фотостимуляции $V_{G4} = 2{,}12 \cdot 10^9$ у. е. (II-B). По оси абсцисс откладываются величины измеряемых биопотенциалов x_1 (в мкВ), по оси ординат – скорости изменения этих же биопотенциалов ($x_2 = dx_1/dt$), а по оси аппликат – ускорение изменения величины биопотенциалов ($x_3 = dx_2/dt$)

Значения энтропии Шеннона *E* для ЭЭГ здорового человека* и человека, больного эпилепсией**, в период релаксации и фотостимуляции

	Здоровый человек		Человек, больной эпилепсией	
	Fz-Ref		*FP*1-*F*3	
	V_{G1}, в период релаксации	V_{G2}, в период фотостимуляции	V_{G3}, в период релаксации	V_{G4}, в период фотостимуляции
1	340825	141201	5,87E+08	1,87E+09
2	198816	210449	5,63E+08	1,9E+09
3	178238	143802	7,89E+08	1,91E+09
4	183355	163453	6,67E+08	1,94E+09
5	163232	132762	5,09E+08	2,09E+09
6	172639	231114	4,53E+08	2,23E+09
7	369461	189869	4,4E+08	2,07E+09
8	455855	188281	4,43E+08	2,12E+09
9	238667	195308	4,46E+08	2,12E+09
10	143882	186960	4,51E+08	2,16E+09
11	239002	147105	4,53E+08	2,21E+09
12	193634	130988	4,5E+08	2,21E+09
13	262394	154202	4,55E+08	2,23E+09
14	300251	187728	4,62E+08	2,28E+09
15	443366	122452	4,33E+08	2,23E+09
$<V_G>$	258908	168378	5,07E+08	2,1E+09

Примечания: * Критерий Вилкоксона, значимость различий выборок $f(x)$: $p = 0{,}01$.
** Критерий Вилкоксона, значимость различий выборок $f(x)$: $p = 0{,}00$.

Матрицы парных сравнений выборок ЭЭГ

Регистрация ЭЭГ при нормогенезе устойчиво демонстрировала особую хаотическую динамику, которая существенно не отличается от динамики кардиоинтервалов, миограмм и других динамичных процессов в организме. При возникновении управляемых режимов (за счет внешней фотостимуляции) организм переходит от одной меры хаоса к другой мере (возможно, даже с некоторым неравномерным распределением), но свойство перемешивания не выполняется, и распределение остается неравномерным (см. рисунок) [1–4]. Иными словами, динамический хаос ЭЭГ не может быть доказан [2–5].

Нечто подобное мы регистрируем и с тремором. В норме постуральный тремор (физиологический) дает нам хаотические квазиаттракторы, 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 [2–5].

Имеется сходная динамика и при работе сердца. Например, перед смертью в ряде случаев сердце начинает биться с весьма устойчивой частотой. Остается как бы один примитивный генератор ритмики. В целом и при эпилепсии, и при треморе в условия болезни Паркинсона, и в работе сердца перед летальным исходом происходит упрощение динамики на фазовой плоскости, т. е. переход от хаоса к доминантным частотам. При этом очень выразительно просматривается такая регуляторная динамика в виде определенных фигур [2–5]. На рисунке видно, что фактический объем квазиаттракторов изменяется и они (квазиаттракторы) принимают в условиях патологии характерную форму при действии внешней стимуляции (фотостимуляции зрительного анализатора).

Квазиаттракторы и энтропия Шеннона для ЭЭГ

В терминах квазиаттракторов нормогенез соответствует равномерному (хаотическому) распределению параметров $x(t)$ в ФПС. При возникновении патологии распределение $x(t)$ становится неравномерным, возникают доминанты патологий, что соответствует неравномерному распределению $x(t)$ в ФПС.

На рисунке представлен трехмерный фазовый портрет ЭЭГ человека с очаговой эпилепсией без внешних воздействий (стимулов, т. е. спокойное состояние) и фазовый портрет этого же пациента в условиях фотостимуляции (навязывания внешнего ритма). Легко видеть, что на рис. II-А уже появляется выраженная неравномерность распределения в фазовом портрете, которая резко усиливается при фотостимуляции. Количественно это проявляется более чем в четырехкратном увеличении объема V_G КА. Например, при внешнем возмущении для больного наблюдается увеличение площади квазиаттрактора от $V_{G3} = 0{,}45 \cdot 10^9$ у. е. до $V_{G4} = 2{,}12 \cdot 10^9$ у. е., т. е. $V_{G1} > V_{G2}$. Такая динамика резко отличается от картины для нормогенеза, где $V_{G1} = 262364$ у. е. $< V_{G2} = 154202$ у. е. [2–7]. Также следует отметить, что визуально КА представляет собой приплюснутый тор из-за высокой генерализации ЭЭГ у больного эпилепсией человека. Слабые признаки присутствия генерализации имеются и на примере здорового человека в период фотостимуляции при построении трехмерного КА, что не очевидно при построении двумерного КА.

Анализ матриц парного сравнения выборок ЭЭГ позволяет сделать вывод, что у человека, больного эпилепсией, и без фотостимуляции уже имеется большое количество совпадений ($k = 97$) из-за присутствия некой генерализации в работе мозга даже в период релаксации, а при фотости-

муляции число совпадений несколько увеличивается (k = 102). Это свидетельствует об определенном нарастании этой генерализации. Такая динамика связана 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 = 25, а в период фотостимуляции k = 34, т. е. тоже увеличивается, но на существенную (относительную) величину (на 12 %) [2–5].

В рамках новой теории хаоса – самоорганизации (ТХС) были рассчитаны объемы V_G для выборок ЭЭГ, значения которых представлены на рисунке. Как мы видим, с позиции ТХС КА здорового испытуемого и испытуемого, больного эпилепсией, имеют статистичестически значимые различия до фотостимуляции (период релаксации) и во время фотостимуляции. Энтропийный же подход в сравнительном анализе обладает низкой чувствительностью, так как среднее значение энтропии $<E>$ для здорового человека имеет различия в третьем знаке ($<E_1>$ = 3,099, $<E_2>$ = 3,122), а значимость различий выборок $f(x)$ вообще отсутствует, p = 0,80, что горазда выше уровня значимости критерия Вилкоксона $p < 0{,}05$. Такую же динамику мы наблюдаем и для человека, больного эпилепсией. Здесь среднее значение немного отличается ($<E_1>$ = 2,840, $<E_2>$ = 2,872), но этой разницы в значениях E недостаточно, и эти две выборки при статистическом сравнении можно отнести к одной генеральной совокупности (значимость различий выборок $f(x)$, полученных с помощью T-критерия, p = 0,65, критический уровень значимости T-критерия $p < 0{,}05$) [5].

Внешний вид фазовых траекторий и объемов квазиаттракторов для ЭЭГ (на примере одного опыта) мы представили на рисунке. Здесь фазовые координаты x_1 – реальные значения биопотенциалов мозга, $x_2 = dx_1/dt = V$ – это скорость изменения биопотенциалов мозга, а x_3 – ускорение изменения этих биопотенциалов. Очевидно, уменьшение объемов V_{G1} по отношению к V_{G2} в 1,7 раза для здорового человека и увеличение объемов V_{G2} по отношению к V_{G1} в 4,7 раза для больного эпилепсией – это и есть характеристика ЭЭГ здорового и больного человека. Расчет КА является аналогом принципа Гейзенберга в биологии и психологии [2–5].

В рамках ТХС мы можем использовать фазовую плоскость при повторении опытов (получать выборки с повторением) и для них строить КА выборок ЭЭГ. При этом полностью уходить от стохастики пока не следует. Необходимы модификации, внедрение новых методов в комплексе с методами ТХС [1–5].

Заключение

Сравнение традиционных стохастических методов обработки электроэнцефалограмм и методов ТХС показывает низкую эффективность моделей в рамках расчета статистических функций $f(x)$ выборок ЭЭГ и их энтропий E. ЭЭГ испытуемых в период релаксации и период фотостимуляции весьма затруднительно анализировать с позиций стохастики любые выборки ЭЭГ (из-за статистической неустойчивости этих выборок, т. е. $f_j(x_i) \neq f_{j+1}(x_i)$).

Новые методы расчета ЭЭГ на основе ТХС, которые используют двумерное, а в нашем случае и трехмерное фазовое пространство с координатами ЭЭГ x_1, x_2 и x_3, и метод расчета матриц парных сравнений выборок ЭЭГ (расчет числа k пар «совпадений» выборок ЭЭГ) реально могут характеризовать интегральные значение параметров ЭЭГ при разных стимуляциях и функциональных состояниях мозга. При этом мы можем различать и гомеостаз нейросетей мозга (и самого мозга в норме и при патологии).

Литература

1. *Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатов М.А., Стрельцова Т.В.* Стресс-реакция на холод: энтропийная и хаотическая оценка // Национальный психологический журнал. 2016. № 1 (21). С. 45–52.
2. *Зилов В.Г., Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В.* Экспериментальное подтверждение эффекта «Повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2017. № 1. С. 4–9.
3. *Betelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A., Gavrilenko T.V.* Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems // Doklady Mathematics. 2017. V. 95, № 1. P. 92–94.
4. *Eskov V.M., Bazhenova A.E., Vochmina Y.V., Filatov M.A., Ilyashenko L.K.* Bernstein hypothesis in the description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // Russian Journal of Biomechanics. 2017. V. 21 (1). P. 14–23.
5. *Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Vochmina Yu.V.* Formalization of the Effect of “Repetition without Repetition” by N.A. Bernstein // Biofizika. 2017. V. 62 (1). P. 143–150.

Гомеостатичный мозг: хаос нейросетей мозга

В.М. Еськов, В.А. Галкин, О.Е. Филатова, В.В. Еськов

Сургутский государственный университет

Введение

Кооперация хаоса и самоорганизации имеет двойственную основу, которая выражает общую неопределенность в принципах работы нейросетей мозга. Во-первых, наука уже более ста лет использует детерминистские и стохастические подходы в изучении отдельного нейрона и нейросетей мозга в целом. Модели на основе функционального анализа (уравнение Блэйра, модель *Ходжкина – Хаксли*, компартментно-кластерная теория нейросетей (ККТН) мозга и многое другое) и различные стохастические подходы в виде нейроЭВМ (НЭВМ), сетей Питса – Мак-Каллока и т. д. (на основе стохастического подхода) – все это свидетельствует о детерминистско-стохастической доминанте в изучении глобальной проблемы «мозг человека и базовые принципы его функционирования». При этом проблемы мышления и эвристической деятельности мозга обычно дальше морфологии и характера связей между нейронными пулами не уходят. Мы сейчас предлагаем другой подход и понимание принципов работы мозга, которые выходят за рамки детерминизма и стохастики и переводят эту дискуссию в область хаоса и непрерывной самоорганизации. При этом нет статистической устойчивости выборок x_i параметров гомеостаза для статистических функций распределения выборок, наблюдается $f_j(x_i) \neq f_{j+1}(x_i)$, где j – номер выборки.

Неустойчивость динамики нейросетей

В рамках детерминистской и стохастической науки (ДСН) современное естествознание достигло определенных успехов. Однако всегда за кадром в этих исследованиях оставалась проблема хаотической динамики наблюдаемых биоэлектрических процессов. Всегда считалось, что процессы возбуждения отдельных нейронов и пулов – это объект ДСН, конкретно стохастики. При этом специалисты по изучению мозга на уровне подсознания чувствовали, что повторить любой процесс в нейросетях мозга в рамах ДСН весьма проблематично. Впервые открыто и аргументированно на это указал в 1947 г. Н.А. Бернштейн, который выдвинул гипотезу о «повторении без повторения» в системах организации движений. Но это была только гипотеза, без должного количественного изучения [1–5].

Одновременно столетиями биологи и медики были уверены в морфологической повторяемости структур мозга. Упорно создавалась иллюзия, что морфологически структуры мозга вроде повторяются (для этого существует анатомия и атласы мозга), а раз это так, то и функции мозга тоже вроде должны повторяться. Но это иллюзии и утверждения из области гипотез. Морфологическая устойчивость и схожесть структур мозга автоматически переносилась и на якобы одинаковое устройство функций и регуляций в нейросетях мозга.

Десятилетиями нейрофизиология изучала связи между ядрами, различными структурами мозга, и при этом возникала вторая иллюзия о якобы каких-то знаниях о функциях мозга. Если морфология подобна и функции нейросетей тоже подобны (одинаковы), то мы были глубоко уверены, что, зная морфологию (структуру мозга) и характер связей между структурами (ядрами, группами нейронов), мы знаем все о работе мозга. Морфофункциональная организация мозга сейчас является основой неврологии, нейробиологии, психологии и других наук. В последние годы активно привлекаются новейшие методы сканирования структур мозга, находящегося в разных условиях. Возникают даже новые гипотезы о работе мозга, новые знания о строении и функции мозга, его отделов, проводящих путях, системах регуляции и управления [4–10, 12, 13].

Однако при этом никто не задает элементарный вопрос о повторяемости этих связей и регистрируемых процессов возбуждения. Есть ли какая-либо возможность повторить тот или иной вид возбуждения, ту или иную выборку электроэнцефалограммы (ЭЭГ) или электронейрограммы (ЭНГ)? Что и как можно повторить и до какой степени повторяются ЭЭГ и ЭНГ в нейросетях мозга? Следуя сомнениям Н.А. Бернштейна относительно повторяемости движений, сейчас можно гипотетически говорить о неповторяемости ЭЭГ и ЭНГ. Однако что из этого следует для нейрофизиологии, психологии и всей науки? О какой повторяемости может идти речь, если мы изучаем гомеостатичный мозг, находящийся в спокойном состоянии (релаксации) и в якобы неизменном морфологическом состоянии? [4, 10–13]. Что понимать под изменениями или неустойчивостью в работе нейросетей мозга?

Аналог принципа неопределенности Гейзенберга в теории нейросетей

За 70 лет с момента опубликования работы Н.А. Бернштейна никто не пытался решить проблему «повторение без повторений», а если она и возникала, то оставалась без ответа. Доминировала догма естествознания: все процессы (включая работу мозга) можно описывать в рамках функционального анализа или с позиции стохастики. Достаточно построить уравнение или найти статистическую функцию распределения $f(x)$, и мы уже обладаем полной информацией о процессе [4–10]. Это фундаментальная догма всего современного естествознания и всех наук о мозге. Однако это сейчас стало скорее гипотезой, чем реальностью.

Первые сомнения зародил Н.А. Бернштейн в 1947 г. в связи с изучением организации движений, когда он декларировал наличие как минимум пяти (A-, B-, C-, D-, E-системы) систем регуляции любого вида движений. Он утверждал, что роль и значение (вес) этих систем непрерывно (а мы сейчас добавили: и хаотически) изменяются. Тогда действительно, любые движения произвольно повторить невозможно [5–11].

Сейчас же с позиции ДСН (в частности, стохастики) мы доказали, что любой акт движения не может быть произвольно статистически повторен. Все происходит без повторений с позиции стохастики, и тем более в рамках функционального анализа [1–5]. В психологии установлен эффект Еськова – Зинченко, который доказывает статистическую неустойчивость любого акта движения в биомеханике. И это, как оказалось, касается и произвольных, и непроизвольных движений [4–12]. Для примера из области нейросетей мозга мы представляем две матрицы парного сравнения (выборки ЭЭГ (табл. 1) и ЭМГ (табл. 2) у одного и того же испытуемого в неизменном гомеостазе).

Таблица 1

Матрица парного сравнения выборок электроэнцефалограмм одного и того же здорового человека[1]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,00	**0,32**	**0,05**	0,10	**0,64**	0,01	**0,55**	0,00	**0,28**	**0,31**	0,00	**0,90**	0,00	0,00
2	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,58**
3	0,32	0,00		**0,75**	0,00	0,03	**0,67**	**0,19**	0,00	0,01	**0,30**	0,02	**0,10**	0,00	0,00
4	0,05	0,00	0,75		0,00	**0,07**	**0,83**	0,00	0,00	0,00	**0,06**	0,03	0,04	0,00	0,00
5	0,10	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	**0,41**	**0,38**	**0,66**	0,03	0,00	**0,21**	0,00	0,00
6	0,64	0,00	0,03	0,07	0,00		**0,21**	**0,86**	0,00	**0,21**	**0,52**	0,00	**0,66**	0,00	0,00
7	0,01	0,00	0,67	0,83	0,00	0,21		0,02	0,00	0,00	0,01	**0,19**	0,00	0,00	0,00
8	0,55	0,00	0,19	0,00	0,41	0,86	0,02		**0,08**	**0,93**	**0,15**	0,00	**0,97**	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38	0,00	0,00	0,08		**0,06**	0,00	0,00	**0,07**	0,00	0,01
10	0,28	0,00	0,01	0,00	0,66	0,21	0,00	0,93	0,06		0,00	0,00	**0,36**	0,00	0,00
11	0,31	0,00	0,30	0,06	0,03	0,52	0,01	0,15	0,00	0,00		0,00	0,05	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
13	0,90	0,00	0,10	0,04	0,21	0,66	0,00	0,97	0,07	0,36	0,05	0,00		0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
15	0,00	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Примечание: [1] Число повторов $N = 15$. Использовался критерий Вилкоксона (критерий значимости $p < 0,05$, число совпадений $k = 33$). Жирным выделен достигнутый уровень значимости (критическим уровнем принят $p < 0,05$).

Таблица 2

Матрица парного сравнения выборок электромиограмм одного и того же здорового человека[1]

	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	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,08	0,00	0,00	0,59
3	0,00	0,00		0,17	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	**0,17**		0,01	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	0,01		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		0,07	0,81	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00
7	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	**0,07**		0,05	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,23	0,04
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,81**	**0,05**		0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03		0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,46**		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	**0,08**	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,31**	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,97
13	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
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,21**	**0,23**	**0,45**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
15	0,00	**0,59**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,97**	0,00	0,00	

Примечание: [1] Число повторов $N = 15$. Использовался критерий Вилкоксона (критерий значимости $p < 0,05$, число совпадений $k = 12$). Жирным выделен достигнутый уровень значимости (критическим уровнем принят $p < 0,05$).

При изучении работы нейросетей дыхательного центра мы еще в 70-е гг. XX в. показали, что, будете ли вы регулярно дышать (сознательно) или дышать во сне (бессознательно), повторить любой акт вдоха или выдоха в рамках стохастики весьма затруднительно. Все происходит хаотично, «без повторений», как предполагал Н.А. Бернштейн в 1947 г., однако степень этого хаоса никто не измерял и не моделировал, многие ученые были уверены в моделях динамического хаоса Лоренца. Нет количественных данных в этой области с позиции современной науки, мы остаемся в рамках стохастической догмы об устойчивости (стохастической) в системах регуляции движений, в частности в работе нейросетей мозга.

Центральная догма (или иллюзия?) естествознания (и особенно теория нейросетей мозга и всей науки о мозге) продолжает доминировать во

всей медицине, биологии и психологии. Мы все измеряем в рамках стохастики или даже в рамках функционального анализа [5–13]. Это касается и нейронаук, которые активно оперируют спектральными плотностями сигнала (СПС), автокорреляционными $A(t)$ и фрактальными размерностями.

Теоретическая биофизика и нейробиология с момента своего возникновения постоянно пытаются найти аналоги поведения сложных биологических динамических систем и объектов неживой природы в области ДСН. Для подтверждения этого достаточно вспомнить фундаментальное выступление A.V. Hill. Имеются и некоторые итоговые издания, которые еще в 30-х гг. XX столетия представляли подобные аналогии между физическими системами и БДС. Существенно, что в этих многочисленных попытках очень мало примеров установления аналогии между объектами квантовой механики и СТТ. В рамках теории хаоса – самоорганизации (ТХС) мы ввели принцип неопределенности для сложных СТТ (complexity), который является некоторым аналогом соотношения Гейзенберга [10–13]. Однако проблема неопределенности динамики поведения объектов микромира может реально иметь некоторые общие корни с объектами макромира, например со сложными биосистемами (complexity).

На это обращал внимание и M. Gell-Mann в своем известном обращении, посвященном проблеме неопределенности для complexity, но при этом нобелевский лауреат оставался в рамках ДСН. Он считал complexity объектом динамического хаоса Лоренца. Принципиальная непредсказуемость и неповторимость динамики поведения сложных динамических систем обусловлена особыми свойствами сложных БДС, которые мы сейчас определяем как системы третьего типа (СТТ).

В современной теоретической биофизике СТТ определяют как complexity, но при этом нет строгого определения этих систем и их свойств [10–13]. Сейчас мы говорим о неизменном гомеостазе мозга (его нейросетей), если сохраняются параметры квазиаттракторов ЭЭГ, ЭНГ или ЭМГ у испытуемого (в его неизменном гомеостазе). При этом выборки ЭЭГ, ЭМГ непрерывно и хаотически изменяются (см. табл. 1 и 2). Они демонстрируют стохастическую неустойчивость, когда получить произвольно $f_j(x_i) \neq f_{j+1}(x_i)$ практически невозможно.

Первые попытки ввести некоторое понятие о СТТ были выполнены 65 лет назад Warren Weaver в его известной публикации «Science and complexity». Однако, вводя понятие организованной сложности, W. Weaver тогда не выполнил систематизацию таких объектов, их основных свойств и, главное, не предложил методы и модели для их описания.

Традиционные физические подходы в биофизике на уровне complexity, как это и представлял в 50-х гг. XX в. A. Hill, не дали нужных результатов из-за особых свойств СТТ [1–6]. Многочисленные попытки H. Haken и I.R. Prigogine в области синергетики и теории complexity также закончились безрезультатно в плане выделения особого математического аппарата и особых моделей для описания complexity с самоорганизацией. Более того, сам Пригожин в предсмертной статье «The Dieisnot Cast» особым образом выделил системы в природе, которые современная наука не изучает и не описывает. Речь идет об уникальных системах без их повторения в пространстве и времени. Однако, как мы сейчас доказываем, именно эти системы и составляют основные объекты в биологии и медицине [5–10]. СТТ составляют основу всей современной медицины, биологии и психологии.

Во-первых, все СТТ (complexity в трактовке Пригожина – Хакена) не имеют точек покоя в традиционном (детерминистско-стохастической науке) плане. Например, для СТТ никогда их ВСС $x = x(t)$ не сможет продемонстрировать стационарный режим в виде $dx/dt = 0$. Для любой СТТ их ВСС в ФПС испытывает непрерывное и хаотическое движение. Это движение (как и движение электрона в условиях энергетических ограничений, например в потенциальной яме или на определенном энергетическом уровне в атоме) ограничено определенными рамками, накладываемыми на фазовые координаты. Таким образом, СТТ не имеет стационарных режимов в аспекте ДСП, но их движение в ФПС ограниченное [5–10]. Эти ограничения имеют аналоги с принципом Гейзенберга в квантовой механике, но есть и специфика СТТ [7–13].

Во-вторых, в биомеханике такими фазовыми координатами являются положение конечности (пальца при постуральном треморе) по отношению к регистрирующему датчику – $x_1 = x_1(t)$ и скорость перемещения конечности $x_2 = x_2(t) = dx_1/dt$. Для ЭЭГ и ЭМГ координаты биопотенциалов $x_i(t)$ образуют фазовое пространство вектора $x = x(t) = (x_1, x_2)^T$, где $x_2 = dx_1/dt$, а площадь квазиаттрактора $S = \Delta x_1 \cdot \Delta x_2$, где Δx_1 – вариационные размахи любой координаты x_i [5–12].

На фазовой плоскости вектора $x = (x_1, x_2)^T$ можно построить фазовые траектории, которые все-таки будут иметь определенные границы в пределах фазового пространства. Эти границы образуют некоторую область в ФПС, которая характеризует физиологическое (психическое) состояние субъекта (испытуемого) и которую мы будем обозначать как квазиаттрактор – КА [1–8]. Объем квазиаттрактора (V_G) является важной характеристикой объекта, и он используется сейчас нами в биологии, психологии и медицине для диагностики функций организма испытуемого. Таким образом, квазиаттракторы – важная характеристика любой СТТ (complexity), динамики поведения их ВСС. Гомеостаз мозга тоже описывается КА [10, 12, 13].

Это особый тип гомеостатических систем, которые находятся в непрерывной хаотической динамике, и для них отсутствует возможность какого-либо прогноза в будущем их конечного состояния $x(t_u)$. Именно это пытался сказать M. Gell-

Mann в своем обращении, но только в отношении физических систем. У этих особых СТТ наряду с особым хаосом имеются и механизмы самоорганизации. Поэтому мы сейчас разрабатываем новые методы описания систем третьего типа (отличных от детерминистских и стохастических систем), которые базируются на новой теории хаоса – самоорганизации – ТХС [1–6].

Эта ТХС включает в себя 5 принципов организации СТТ: компартментно-кластерное строение, свойство «мерцания» СТТ (когда непрерывно $dx/dt \neq 0$), эволюцию СТТ и их телеологическое движение к некоторому конечному квазиаттрактору, наконец, возможность выхода не только за 3 сигмы, но и за 10, 20 сигм, что в стохастике исключено полностью. Последнее свойство гигантских отклонений от координат центра квазиаттрактора характерно только для БДС. Именно эти принципы и эти новые методы (расчета квазиаттракторов) и лежат сейчас в основе работы мозга, организации активности его нейросетей [10, 12, 13]. Подчеркнем, что нейросеть мозга, хаотичная динамика задает общий хаотичный непрерывный калейдоскоп статистических функций распределения выборок ЭЭГ, всей эффекторной части. В первую очередь речь идет о нервно-мышечной системе, которая регулируется структурами мозга.

Сейчас мы говорим о гомеостатичном мозге, его гомеостаз проявляется в неизменности параметров квазиаттракторов биоэлектрической активности нейросетей мозга (у нас это ЭЭГ и, как следствие, ЭМГ в табл. 1 и 2). Гомеостаз мозга (и его частей, кластеров) сейчас активно нами моделируется в рамках компартментно-кластерной теории биосистем (ККТБ), которая оценивает иерархические системы в рамках детерминистских моделей, но с хаотическим изменением параметров самих этих моделей. Это новое направление в нейробиологии и физиологии ЦНС.

Литература

1. *Баженова А.Е., Башкатова Ю.В., Живаева Н.В.* Хаотическая динамика ФСО человека на Севере в условиях физической нагрузки. Тула, 2016. 318 с.

2. *Белощенко Д.В., Майстренко Е.В., Алиев А.А., Сорокина Л.С.* Влияние локального холодового воздействия на параметры электромиограмм тренированного испытуемого // Клиническая медицина и фармакология. 2016. Т. 2, № 3. С. 42–46.

3. *Белощенко Д.В., Якунин В.Е., Живаева Н.В., Алексенко Я.Ю.* Эффект Еськова – Зинченко в анализе электромиограмм // Вестник новых медицинских технологий [Электронное издание]. 2017. Т. 11, № 1. С. 38–44.

4. *Веракса А.Н., Филатова Д.Ю., Поскина Т.Ю., Клюс Л.Г.* Термодинамика в эффекте Еськова – Зинченко при изучении стационарных состояний сложных биомедицинских систем // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, № 2. С. 18–25.

5. *Еськов В.В., Филатов М.А., Филатова Д.Ю., Прасолова А.А.* Границы детерминизма и стохастики в изучении биосистем-complexity // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 1. С. 83–91.

6. *Еськов В.М., Филатова О.Е., Хадарцева К.А., Еськов В.В.* Универсальность понятия «гомеостаз» // Клиническая медицина и фармакология. 2015. № 4 (4). С. 29–33.

7. *Еськов В.М., Зинченко Ю.П., Филатов М.А., Еськов В.В.* Эффект Еськова – Зинченко опровергает представления I.R. Prigogine, J.A. Wheeler и M. Gell-Mann о детерминированном хаосе биосистем-complexity // Вестник новых медицинских технологий. 2016. Т. 23, № 2. С. 34–43.

8. *Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В., Филатов М.А.* Хаотический подход в новой интерпретации гомеостаза // Клиническая медицина и фармакология. 2016. Т. 2, № 3. С. 47–51.

9. *Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В.* Формализация эффекта «повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Биофизика. 2017. Т. 62, вып. 1. С. 168–176.

10. *Зилов В.Г., Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В.* Экспериментальное подтверждение эффекта «Повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2017. № 1. С. 4–9.

11. *Зинченко Ю.П., Хадарцев А.А., Филатова О.Е.* Введение в биофизику гомеостатических систем (complexity) // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 3. С. 6–15.

12. *Betelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A., Gavrilenko T.V.* Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems // Doklady Mathematics. 2017. V. 95, № 1. P. 92–94.

13. *Eskov V.M., Bazhenova A.E., Vochmina U.V., Filatov M.A., Ilyashenko L.K.* N.A. Bernstein hypothesis in the description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // Russian Journal of Biomechanics. 2017. V. 21, № 1. P. 14–23.

Исследование синхронных и асинхронных ритмов мозговой активности, возникающих у грызунов, находящихся в состоянии покоя

М.О. Журавлев, А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

В последнее время все больше внимания со стороны исследователей уделяется изучению перемежающегося поведения [1–4]. В первую очередь такой интерес обусловлен тем, что наличие перемежаемости является характерным для многих модельных нелинейных систем, а также для реальных систем. Необходимо отметить, что в исследованиях данного типа поведения большую роль играют статистические характеристики перемежающегося поведения, такие как распределение длительностей ламинарных и турбулентных фаз в зависимости от управляющих параметров изучаемой системы, зависимость средней длительности ламинарных фаз от параметра надкритичности, так как они позволяют определить, какой тип перемежающегося поведения реализуется в исследуемой системе. Тем не менее при изучении реальных систем не всегда существует возможность получить на основе уже имеющихся данных необходимые статистические характеристики перемежающегося поведения, для того чтобы определить, какой тип перемежаемости реализуется в данном случае. Стоит отметить, что такая ситуация является вполне типичной для реальных систем, что, в свою очередь, значительно осложняет понимание процессов, реализующихся в этих системах, с фундаментальной точки зрения. Таким образом, в настоящий момент времени существует острая необходимость в создании новой методики, позволяющей на основе достаточно коротких временных реализаций определять тип перемежающегося поведения, которое реализуется в исходной системе. В рамках настоящей работы предложена новая методика для определения типа перемежающегося поведения в исследуемой системе на основе распределения разности фаз между сигналами, аналогично тому, как это сделано в работе [5]. При этом апробацию предложенная методика определения типа перемежающегося поведения прошла на примере данных электрической активности мозга грызунов, находящихся в состоянии покоя (под воздействием общей анестезии).

Необходимо отметить, что исследованиям, направленным на изучение активности головного мозга [6, 7], с каждым новым годом уделяется все больше внимания со стороны исследователей. В первую очередь такой интерес связан с желанием исследователей понять фундаментальные принципы функционирования головного мозга, а также с возможностью дальнейшего применения полученных знаний для создания интерфейса «мозг – машина». При этом необходимо отметить, что над решением этой сложнейшей междисциплинарной задачи в настоящее время работают многочисленные научные коллективы, а также частные компании (например, Google и Honda). Однако, для того чтобы реализовать столь амбициозные задачи, необходимо понимание всех процессов, возникающих в головном мозге при решении различного рода задач, с фундаментальных позиций. Одним из многочисленных направлений в изучении активности головного мозга является задача, связанная с изучением процессов, возникающих при когнитивном поведении живого субъекта в реальном мире. В настоящее время известно, что в мозге млекопитающих эта функция контролируется нейронной активностью в гиппокампе. Таким образом, задача, связанная с изучением осцилляторной активности нейронных ансамблей в гиппокампе с использованием фундаментальных подходов нелинейной динамики, также представляет значительный интерес.

Как уже было отмечено ранее, в рамках настоящей работы в качестве объекта для апробации методики определения типа перемежающегося поведения выступали грызуны, находящиеся в состоянии покоя (под воздействием общей анестезии). В ходе проведенных исследований была рассмотрена электрическая активность, наблюдающаяся в правом и левом гиппокампах крыс, с использованием непрерывного вейвлетного преобразования с комплексными базисами [8, 9]:

$$W(s,t_0)=\frac{1}{\sqrt{s}}\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\psi^*\left(\frac{t-t_0}{s}\right)dt \qquad (1)$$

с материнским вейвлетом Морле

$$\psi(\eta)=\frac{1}{\sqrt[4]{\pi}}\exp(j\Omega_0\eta)\exp\left(\frac{-\eta^2}{2}\right). \qquad (2)$$

Далее было проведено исследование перемежающейся синхронизации колебаний в путях Шаффера, в ходе которого был использован подход для введения мгновенных фаз, основанный на ранее предложенных методах анализа синхронизации на различных временных масштабах [10, 11]. При этом отличительной особенностью данного метода является то, что мгновенная фаза для исследуемого сигнала вводится не на фиксированном временном масштабе наблюдения, а на «плавающем». При этом было показано, что разница мгновенных фаз, соответствующая активности локальных полевых потенциалов генераторов в правой и левой части гиппокампа, демонстрирует перемежающееся поведение, то есть существуют наиболее типичные участки (ламинарная фаза), где разница мгновенных фаз близка к нулю, а также участки,

которые встречаются значительно реже (турбулентная фаза), где разница мгновенных фаз значительно больше нуля. Далее с использование методики, основанной на оценке вида распределения разности мгновенных фаз сигналов, был определен тип перемежающегося поведения в данной системе. Также тип перемежающегося поведения в данной системе был определен на основе статистических характеристик, при этом получено полное соответствие между традиционной методикой определения типа перемежаемости и разработанной методикой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-32-00181) и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (проект МК-4574.2016.2).

Литература

1. *Москаленко О.И.* Переход к фазовой синхронизации в случае воздействия внешнего хаотического сигнала на систему с периодической динамикой // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 19. С. 72–79.

2. *Hramov A.E.* [*et al.*] Length distribution of laminar phases for type-I intermittency in the presence of noise // Phys. Rev. E. 2007. V. 76, № 2. P. 026206.

3. *Pikovsky A.* [*et al.*] Attractor-repeller collision and eyelet intermittency at the transition to phase synchronization // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 47.

4. *Pikovsky A.* [*et al.*] Phase synchronization of chaotic oscillators in terms of periodic orbits // Chaos. 1997. V. 7. P. 680–687.

5. *Москаленко О.И.* [*и др.*] Оценка степени синхронности режима перемежающейся фазовой синхронизации по временному ряду : (модельные системы и нейрофизиологические данные) // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, вып. 8. С. 606–610.

6. *Buzsaki G., Draguhn A.* Neuronal Oscillations in Cortical Networks // Science. 2004. V. 304. P. 1926.

7. *Rabinovich M.I., Muezzinoglu M.K.* Nonlinear dynamics of the brain: emotion and cognition // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 2010. V. 180 (4). P. 371–387.

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

9. *Torresani B.* Continuous Wavelet Transform. Paris : Savoire,1995.

10. *Zhuravlev M.O., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Ovchinnikov A.A., Hramov A.E.* Ring intermittency near the boundary of the synchronous time scales of chaotic oscillators // Phys. Rev. E. 2011. V. 83. P. 027201.

11. *Zhuravlev M.O., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Hramov A.E.* Method of laminar phase detection in chaotic systems in which two various types intermittency are realized // Vestnik NNGU. 2013. V. 1, № 3. P. 196–200.

Исследование перемежающегося поведения, возникающего при восприятии неоднозначных изображений (куб Неккера): теория и эксперимент

М.О. Журавлев, А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Мозг является одним из наиболее сложных и загадочных объектов для комплексных исследований и привлекает 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., а 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.

Одним из направлений исследования мозга является изучения визуального восприятия с помощью неоднозначных изображений (бистабильных объектов) [4–6]. При этом стоит отметить, что 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 [7, 8].

Данная работа посвящена изучению когнитивного восприятия человеком куба Неккера, классической модели бистабильного объекта, и включает в себя экспериментальную работу, построение теоретической модели выбора человеком куба как «левого» или «правого» для непрямого экспериментального измерения когнитивной «шумовой» характеристики головного мозга человека, а также численное исследование электроэнцефалографий (ЭЭГ) человека с помощью методов нелинейной динамики.

В экспериментальных исследованиях приняли участие 35 здоровых неоплачиваемых добровольцев, мужчин и женщин, в возрасте от 21 до 43 лет, обладающих нормальным или компенсированным до нормального зрением. Экспериментальные работы проводились в утренние и дневные часы при естественном освещении, регистрации всех данных велись с добровольными участниками после полноценного ночного отдыха.

В рамках эксперимента использовались изображения куба Неккера с разной интенсивностью средних линий [9, 10]. 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 Неккера не изменялась и была равна 1. Очевидно, что для значений управляющего параметра $I = 0$ и $I = 1$ практически всегда изображения воспринимаются как «левый» и «правый» кубы соответственно.

В ходе эксперимента добровольцу в случайной последовательности предъявлялись 16 кубов Неккера с различными I, меняющимися от $I = 15$ до $I = 85$. Куб демонстрировался в виде черных линий на белом фоне на экране компьютера. Между предъявлениями различных кубов участнику показывалось стационарное фоновое цветное изображение без каких-либо точек, привлекающих внимание испытуемого и заставляющих фиксировать взгляд. Время предъявления куба Некера составляла 500–700 мс, пауза между двумя различными кубами составляла 1500–2000 мс. Все участники эксперимента были проинструктированы нажимать левую или правую клавишу на пульте управления в зависимости от своего восприятия демонстрируемого объекта.

Каждая экспериментальная запись включала в себя по 10 минут фоновых записей ЭЭГ добровольца до и после активной фазы с восприятием неоднозначных изображений. В целом длительность записи каждого эксперимента достигала 50 минут.

В экспериментальной работе для организации визуального стимулирования и регистрации данных было использовано программное и аппаратное оборудование «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (Медиком МТД). Частота дискретизации ЭЭГ составляла 250 Гц, частотный диапазон данных составлял от 0,016 до 70 Гц с аппаратным режекторным фильтром в 50 Гц. Отметим, что особенности неинвазивной записи ЭЭГ позволяют говорить о достаточной достоверности получаемых данных в частотном диапазоне, не превышающем 50 Гц. Над массивами записей ЭЭГ после регистрации проводились операции препроцессинга, а именно: данные были разделены поканально, переведены в текстовый формат ANSCII, а также стандартными методиками были устранены имеющиеся технические и биологические артефакты. Кроме того, для каждого участника эксперимента была рассчитана вероятность узнавания каждого куба I как левого $Pl(I) = l(I)/(l(I) + r(I))$, где $l(I)$ и $r(I)$ – число нажатий на левую и правую кнопки соответственно.

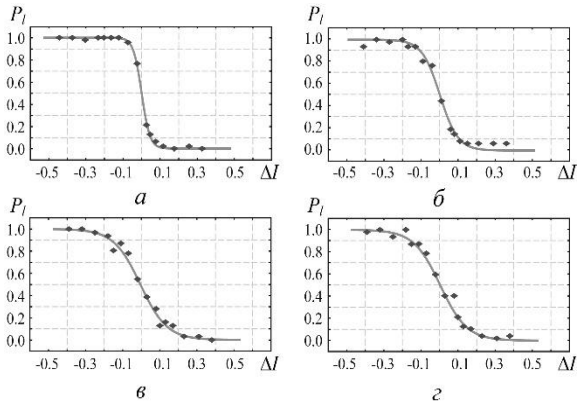


Рис. Экспериментально измеренные зависимости вероятности восприятия иллюзии Неккера как левоориентированного куба P_l (точки) и соответствующие теоретические приближения $\dot{P}_l$ (сплошные линии): *а* – испытуемый 10, D_p = 0,085; *б* – испытуемый 14, D_p = 0,175; *в* – испытуемый 3, D_p = 0,25; *г* – испытуемый 17, D_p = 0,25

Построение математической модели основано на подходе двух конкурирующих нейронных популяций [6, 7], когда восприятие бистабильного объекта описывается с помощью динамической системы с биквадратичным потенциалом, обладающим двумя устойчивыми точками:

$$\dot{x} = -U'(x) + \xi(t), \qquad (1)$$

где потенциальную функцию в общем виде можно записать как

$$U(x) = \frac{a_4}{4}x^4 + \frac{a_3}{3}x^3 + \frac{a_2}{2}x^2 + a_1 x. \qquad (2)$$

Пользуясь математическими подходами, разработанными в теории катастроф, удалось упростить выражение (2), переписав его в форме

$$U(x) = \frac{x^4}{4} - \frac{x^2}{2} + bx. \qquad (3)$$

В данном случае коэффициент b остается неизвестным и индивидуальным для каждого человека. Однако в настоящей работе предлагаем связать коэффициент b со следующим наблюдаемым в эксперименте явлением.

Из объективной оценки исследуемого бистабильного объекта понятно, что куб Неккера с интенсивностью граней I = 0,5 испытуемый должен был бы с одинаковой вероятностью воспринимать как «левый» и как «правый». Однако в эксперименте оказывается, что это значение равновероятного куба никогда не равно 0,5 и меняется для каждого добровольца на некоторую величину ΔI. Произвольно введем взаимосвязь между параметрами b и ΔI следующим образом: $b = \Delta I/\alpha$.

Переходя от формулы (1) к записи выражения в стохастической форме

$$dX = -U'(x)dt + dW, \qquad (4)$$

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 $\rho(x, t)$:

$$\frac{\partial \rho_X(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}[U'(x)\rho_X(x,t)] + \frac{D}{2}\frac{\partial^2 \rho_X(x,t)}{\partial^2 x}. \qquad (5)$$

После некоторых математических выкладок получаем следующее теоретическое выражение для плотности вероятности $\rho(x, t)$:

$$\rho(x) = \exp\left(-\frac{2U(x)}{D}\right). \qquad (6)$$

Таким образом, можно теоретически предсказать, какова будет вероятность восприятия куба с интенсивностью I как левого:

$$\dot{P}_l = \int_{-\infty}^{0} \rho(x)dx. \qquad (7)$$

Из выражений (3), (5) и (7) 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 [10], и на рисунке продемонстрированы результаты теоретического моделирования и экспериментальных измерений восприятия куба Неккера с различными интенсивностями граней.

Таким образом, в результате теоретического рассмотрения были получены аналитические выражения для статистических характеристик данного типа перемежаемости, которые были сопоставлены с экспериментальными результатами, при этом получено хорошее соответствие между теорией и экспериментом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-32-60078).

Литература

1. *Hramov A.E.* [*et al.*]. Wavelets in Neuroscience. Springer, 2015. (Springer Series in Synergetics).

2. *Bear M.F.* [*et al.*]. Neroscience. Exploring the brain. Woters Kluwer, 2015.

3. *Chavez M.* [*et al.*]. Functional Modularity of Background Activities in Normal and Epileptic Brain Networks // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 118701.

4. *Leopold D.A., Logothetis N.K.* Multistable phenomena: changing views in perception // Trends in Cognitive Sciences. 1999. V. 3. P. 254.

5. *Blake R., Logothetis N.K.* Visual competition // Nature Reviews. Neuroscience. 2002. V. 3. P. 13.

6. *Pisarchik A.N.* [*et al.*]. Critical slowing down and noise-induced intermittency in bistable perception: bifurcation analysis // Biological Cybernetics. 2014. V. 108. P. 397.

7. *Tong F., Meng M., Blake R.* Neural bases of binocular rivalry // Trends in Cognitive Sciences. 2006. V. 10. P. 502.

8. *Sterzer P.* [*et al.*]. The neural bases of multistable perception // Trends in Cognitive Sciences. 2009. V. 13. P. 310.

9. *Necker L.A.* Observations on some remarkable optical phaenomena seen in Switzerland; and on an optical phaenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid // London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science. 1832. V. 5, № 1.

10. *Wolberg J.* Data Analysis Using the Method of Least Squares : Extracting the Most Information from Experiments. Springer, 2005.

Комплексный подход к исследованию высших психических функций человека в их взаимосвязи с нейрофизиологическими процессами и личностными характеристиками

М.О. Журавлев[1,2], А.Е. Руннова[1,2], П.А. Протасов[2]

[1] Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
[2] Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

Природа работы головного мозга, разница в личностных качествах, успешности в том или ином виде деятельности – все это интересовало ученых с давних пор [1–4]. Сегодня дальнейшее исследование этого вопроса требует междисциплинарного подхода в силу достаточной количественной разработанности данного вопроса в каждой из сфер и необходимости интеграции усилий исследователей для понимания взаимосвязи этих процессов [5–8]. Одним из таких направлений междисциплинарных исследований является комплексный подход к исследованию высших психических функций человека с одновременным использованием различных методик для оценки взаимосвязи с нейрофизиологических процессов и личностных характеристик.

Одним из валидных средств оценки функции внимания признают ряд тестов – методику таблиц Шульте [9], которая дает представление об эффективности работы, врабатываемости и устойчивости к внешним помехам. При этом таблица Шульте представляет квадратную матрицу, имеющую 5 столбцов и 5 строк, в которых в случайном порядке размещены числа от 1 до 25. Задачей испытуемого было найти все числа в таблице в обратном порядке. Всего предъявлялось 5 таблиц, время для каждой фиксировалось.

В современной неинвазивной нейрофизиологической диагностике ЭЭГ остается одним из основных методов, который дает представление о структуре работы коры головного мозга и ее функциональных особенностях. Объединив данные объективного нейрофизиологического мониторинга и результаты психологического тестирования, можно прогнозировать возможности испытуемых в различных когнитивных процессах. Развитие и углубление представлений о взаимосвязи ЭЭГ с высшими психическими функциями и психологическими чертами личности представляет интерес для науки, позволяя понять физиологическую и личностную основу психологических процессов.

Для проверки взаимосвязи уровня внимания, специфики показаний ЭЭГ-мониторинга и личностных характеристик было проведено тестирование 8 человек, сопоставимых по полу, возрасту, уровню образования и характеру деятельности. Участникам был предложен тест на внимание «Таблицы Шульте», в ходе которого проводился ЭЭГ-мониторинг их мозговой активности. Для получения ЭЭГ-данных было использовано электроэнцефалографическое оборудование «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (Медиком МТД), позволяющее регистрировать многоканальные ЭЭГ с высоким временным разрешением (250 Гц) в течение продолжительного времени. Для записей ЭЭГ был использован монополярный метод регистрации и стандартная международная система размещения электродов «10–20» [10]. Также участники прошли тест «Прогрессивные матрицы Равена» [11, 14] на выявление пространственного фактора интеллекта. После этого испытуемые прошли личностный тест Кеттела. Многофакторный личностный опросник 16PF (Sixteen Personaflity Factor Questionnaire, 16PF) является одним из наиболее распространенных анкетных методов оценки индивидуально-психологических особенностей. Отличительной чертой данного опросника является его ориентация на выявление относительно независимых 16 первичных черт личности.

Группу коммуникативных свойств образуют следующие факторы: A – общительность, H – смелость, E – доминантность, L – подозрительность, N – дипломатичность, Q2 – самостоятельность. В группу интеллектуальных свойств входят следующие факторы: B – интеллектуальность, M – мечтательность, N – дипломатичность, Q1 – восприимчивость к новому.

В группе эмоциональных свойств объединяются следующие факторы: C – эмоциональная устойчивость, F – беспечность, H – смелость в социальных контактах, I – эмоциональная чувствительность, O – тревожность, Q4 – напряженность.

В группу регуляторных свойств личности входят следующие факторы: Q3 – самодисциплина, G – моральная нормативность [12–14].

Оценка динамики частотных составляющих в сигнале ЭЭГ производилась с использованием непрерывного вейвлетного преобразования [15]:

$$W(s,t_0)=\frac{1}{\sqrt{s}}\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\psi^*\left(\frac{t-t_0}{s}\right)dt, \qquad (1)$$

где $x(t)$ – временная реализация экспериментального сигнала, $\psi_{s,t_0}(t)$ – материнский вейвлет, s – временной масштаб, определяющий ширину вейвлета, символ «*» обозначает комплексное сопряжение. В качестве материнского вейвлета был использован комплексный вейвлет Морле [16]

$$\psi(\eta)=(1/\sqrt[4]{\pi})\exp(j\Omega_0\eta)\exp\left(-\eta^2/2\right) \qquad (2)$$

с параметром $\Omega_0 = 2\pi$, что обеспечивает однозначную взаимосвязь между временным масштабом s вейвлетного преобразования и частотой f фурье-преобразования, а именно $f = 1/s$. Вейвлетный анализ является на сегодня одним из наиболее мощных математических инструментов для обработки сложных нестационарных зашумленных данных, ограниченных короткими временными рядами [13, 17].

В рамках настоящей работы было выявлено три различных подхода к выполнению задания.

1. Попытка сделать задание «в лоб» и «на навыке внимания». Активность преобладает в правом полушарии и в лобных долях левого, отвечающих за фокусирование внимания. Деятельность проходит без выработки определенной стратегии для выполнения задания, что хорошо подтверждается данными теста. Эффективность работы на высоком уровне – среднее время серии 33 с. Устойчивость внимания – 0,9 при целевом показателе 1. Врабатываемость средняя – 1,24 при целевом показателе 1. Очевидно, что испытуемым из данной группы будет сложно поддерживать такой темп работы долгое время. В личностном тесте у таких испытуемых наблюдается выраженная склонность к работе в одиночку, низкий самоконтроль, нетерпимость к неопределенности и промедлению в принятии решений, которая может выражаться в тревожности. Им также присущи высокий интеллект, аналитический склад ума и критическое мышление, дух экспериментаторства.

2. В начале теста происходит процесс анализа задачи, попытка упростить и формализовать ее с помощью построения стратегии. В рамках первого теста происходит максимальная изолированность между полушариями по высокочастотной активности (задание делается «в лоб»). Далее испытуемыми вырабатывается некая стратегия для прохождения теста, что, в свою очередь, позволяет им снизить нагрузку на правое полушарие. При этом у испытуемых из данной группы эффективность работы на высоком уровне – среднее время серии 33,6 с. Устойчивость внимания – 0,86 при целевом показателе 1. Врабатываемость средняя – 1,07 при целевом показателе 1. Необходимо незначительное время для адаптации. Испытуемые не испытывают выраженного утомления и способны эффективно поддерживать работу длительное время. Личностные профили гармоничны, сочетают в себе высокие показатели по шкалам интеллекта, эмоциональной зрелости, самоконтроля. Акцентированные шкалы отсутствуют.

3. Третья группа испытуемых отличается билатеральной организацией процессов внимания в обоих полушариях. Комбинирование навыков произвольного фокусирования внимания через лобные доли (правое полушарие) и попыток одновременно с этим оптимизировать алгоритм работы с заданием (левое полушарие). Эффективность работы средне-низкая – среднее время серии 40,2 с. Устойчивость внимания – 1,07 при целевом показателе 1. Врабатываемость высокая – 0,97 при целевом показателе 1. Испытуемые из данной группы могут сразу включаться в незнакомый вид деятельности и поддерживать высокий темп с эффективностью работы выше средне-низкой. Испытуемые творчески подходят к решению задания, пытаясь объединить два разных подхода к выполнению, немного жертвуя эффективностью, однако это компенсируется высокой пластичностью нервных процессов и устойчивостью к утомлению. В личностном тесте у таких испытуемых наблюдается, как и у первой группы, выраженная склонность к работе в одиночку, высокий интеллект, аналитический склад ума и критическое мышление, нетерпимость к неопределенности и промедлению в принятии решений. Однако их отличает более высокий самоконтроль, отсутствие тревожности, выраженные лидерские качества, некоторая склонность к противопоставлению себя группе, желание в ней доминировать.

Применение комплексного подхода к исследованию высших психических функций в их взаимосвязи с нейрофизиологическими процессами и личностными характеристиками позволяет добиться более глубокого понимания причин происходящих процессов, позволяя выявлять и прогнозировать оптимальный тип деятельности для каждого конкретного человека. Практическая реализация предложенной модели диагностики позволяет сократить затраты на дорогостоящее обучение высококлассных специалистов при профессиональном отборе, разработать варианты коррекции карьерной траектории уже работающих сотрудников, оптимизировать сроки и затраты на психодиагностику. В научной сфере особый интерес может вызвать возможность прогнозировать результаты психологического тестирования на основе объективных данных нейрофизиологического наблюдения в качестве взаимодополняющих.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 16-12-10100).

Литература

1. Клиническая психология : словарь / под ред. Творогова Н.Д. М. : ПЕР СЭ, 2007. 456 с.

2. *Степанов С.Ю., Семенов И.Н., Блейхер В.М.* Рефлексивная психология и педагогика творческого мышления. Запорожье : Запорож. гос. ун-т, 1998. 274 с.

3. Практическая психология в тестах, или Как научиться понимать себя и других. М. : АСТ-ПРЕСС, 1999. 376 с.

4. *Абульханова-Славская К.А.* Деятельность и психология личности. М. : Наука, 2009. 324 с.

5. *Зейгарник Б.В.* Патопсихология. М., 2001. 324 с.

6. *Исаев М.В., Исайчев С.А.* Количественные и качественные индикаторы формирования антиципации у спортсменов-борцов. 2015.

7. *Каташинский В.Н., Аминев Г.А., Аминев Э.Г., Варданян А.Н.* Нестабильность навыков: характеристики мозговых настроек. 2010.

8. *Кайгородова Н.З., Яценко М.В., Афанасьев Н.И.* ЭЭГ-корреляты особенностей реагирования на музыку разных стилей в контексте индивидуальных особенностей личности. 2013.

9. *Глозман Ж.М.* Нейропсихологическое обследование: качественная и количественная оценка данных. М. : Смысл, 2012.

10. *Jasper H.H.* The Ten-Twenty Electrode System of the International Federation // Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. 1958. V. 10. P. 371–375.

11. Прогрессивные матрицы Равена : методические рекомендации / сост. и общая редакция О.Е. Мухордовой, Т.В. Шрейбер. Ижевск : Удмурт.ун-т, 2011. 70 с.

12. *Равен Дж.К., Равен Дж., Курт Дж.Х.* Руководство к прогрессивным матрицам Равена и словарным шкалам. Раздел 1 : Общая часть руководства. М. : Когито-Центр, 1997. 76 с.

13. *Капустина А.Н.* Многофакторная личностная методика Р. Кэттелла. СПб. : Речь, 2001.

14. Практическая психодиагностика : методики и тесты : учеб. пособие. Самара : Бахрах, 1998.

15. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Makarov V.A., Pavlov A.N., Sitnikova E.Yu.* Wavelets in Neuroscience. Heidelberg ; New York ; Dordrecht ; London : Springer, 2015.

16. *Torresani B.* Continuous Wavelet Transform. Paris : Savoire, 1995.

17. *Sitnikova E.Yu., Hramov A.E., Grubov V.V., Koronovskii A.A.* Age-Dependent Increase of Absence Seizures and Intrinsic Frequency Dynamics of Sleep Spindles in Rats // Neuroscience Journal. 2014. V. 2014. Art. 370764.

«Когновизор» – устройство слежения за когнитивной деятельностью

Г.А. Иваницкий, И.В. Таротин

[1]Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Введение

Если бы существовало устройство, которое могло следить за ходом мышления человека и отображать этот ход на экране компьютера в реальном времени в наглядной форме, то полезных применений такому устройству можно было бы найти множество. Например, оно могло бы использоваться в профессиональном отборе и обучении, военной сфере, психиатрии, а также, несомненно, было бы полезным в научных исследованиях в области когнитологии – как инструмент объективного измерения изучаемого предмета.

Казалось бы, это фантастика. Однако в действительности на сегодняшний день создание такого прибора не выглядит нереальным. Опыт исследований, проведенных в Лаборатории высшей нервной деятельности человека Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН (ЛВНДЧ ИВНД и НФ РАН), а также данные мировой научной литературы последних лет однозначно говорят о реальности создания такого прибора. Более того, работоспособный макет такого устройства – «когновизор» – был создан нами и описывается в настоящей статье. Представленная технология основана на анализе объективно регистрируемых сигналов мозга, а именно ЭЭГ – в частности, ее ритмов – в процессе мышления.

«Когновизор» должен, во-первых, распознавать в реальном времени характер осуществляемого мышления, а во-вторых, отображать на экране виды мыслительной деятельности в их взаимных отношениях и показывать, какой из них в настоящий момент наиболее активен. Указанные две составные части предлагаемой новой технологии были разработаны в предыдущие годы в ЛВНДЧ.

Возможность распознавания характера мыслительной деятельности по коротким реализациям ЭЭГ была впервые продемонстрирована в 1997 г. в работе [1], а затем многократно подтверждена в последующих работах [2, 3]. Методика основана на оценке текущей спектральной мощности многоканальной ЭЭГ и использовании простой искусственной нейронной сети в качестве классификатора. Построение карты когнитивного пространства человека на основе данных ЭЭГ осуществлено в работе [4] с применением метода многомерного шкалирования [5]. Таким образом, для создания «когновизора» необходимо было лишь объединить две уже имеющиеся методики, добавив к ним реальное время.

Мировой уровень исследований по распознаванию когнитивных состояний с использованием сигналов мозга

Одновременно близкие по тематике исследования проводятся за рубежом. В большинстве случаев работы, основанные на анализе данных ЭЭГ, ведутся в рамках парадигмы «интерфейс “мозг – компьютер”» (ИМК). В связи с этим распознаются когнитивные состояния, пригодные для безмускольного управления внешними устройствами. В качестве таких состояний часто выбираются воображаемые движения. В работе [6] производили управление курсором в реальном времени, используя показатели мощности ритмов моторной коры в определенных индивидуально-зависимых частотных диапазонах. В работе [7] в реальном времени распознавали четыре типа воображаемых движений, применив методику десинхронизации, связанной с событием (ERD, Event Related Desynchronization) и линейный дискриминант Фишера в качестве классификатора. Точность распознавания единичных воображаемых движений достигала 98 %. ИМК, основанный на воображаемых движениях, разрабатывается в России коллективом исследователей под руководством проф. А.А. Фролова. Применение дополнительных методов обработки исходного сигнала, например метода независимых компонент (ICA, Independent Component Analysis), позволило повысить надежность и чувствительность системы [8]. Если говорить об исследованиях по распознаванию ментального состояния по ЭЭГ вне парадигмы ИМК, то такие исследования проводились в лаборатории Ольги Суриной в Сингапуре [9]. Появление коротких эпизодов решения арифметической задачи на фоне текущей ЭЭГ выявляли с надежностью, близкой к 100 %, с помощью мультифрактального анализа.

Бóльших успехов в области распознавания ментальных состояний человека зарубежные исследователи достигли, используя сигнал фМРТ. Наиболее идеологически близкой к описанному в настоящей статье «когновизору» является работа, выполненная в университете Карнеги – Мелона [10]. В ней определенные когнитивные состояния распознавались по фМРТ в псевдореальном времени с точностью до временного разрешения метода, которое составляло около 5 с. Для распознавания применяли, как и мы, обучаемый классификатор. Главное сходство с нашей работой состоит в схожем понимании глобальных задач исследования и возможного применения разработанного подхода. Авторы позиционируют созданную ими методику как основу для будущего

исследовательского инструмента, позволяющего отслеживать «траекторию мысли» человека, что полезно, по их мнению, во многих практических приложениях: обучении, когнитивных исследованиях, медицине (в частности, неврологии и психиатрии). Однако разрабатываемый Т. Митчелом с коллегами подход имеет большое отличие от нашего, которое связано с важным преимуществом фМРТ перед ЭЭГ, а именно возможностью непосредственно выявлять активные зоны мозга. В то время как наш «когновизор» настраивается строго индивидуально (кросс-индивидуальная классификация когнитивных состояний по ЭЭГ не работает, как показывает наш опыт), методика Т. Митчела позволяет (при выполнении некоторых процедур, компенсирующих индивидуальную вариабельность формы и размеров головы) проводить распознавание ментальных состояний человека на кросс-индивидуальной основе. В отличие от фМРТ, для которой картины активации зон мозга при разного рода когнитивной деятельности принципиально схожи для всех людей, картина электрической активности чрезвычайно индивидуально-вариабельна, но при этом для каждого данного индивида высоко устойчива, воспроизводима и составляет, как мы говорим, «электроэнцефалографический портрет личности» [3].

Организация эксперимента

Для отладки предварительного макета устройства нам необходимо было иметь вполне определенные, известные когнитивные состояния человека, чередующиеся во времени. Для этого, как и во всех наших предыдущих работах, мы предъявляли испытуемым задания нескольких видов в случайной последовательности, со случайными интервалами. На деле были использованы данные, полученные ранее в экспериментах, описанных в работах [3, 4]. Соответственно, прибор работал не в реальном, а в псевдореальном времени: данные подавались на «когновизор» из записи в том же темпе, в каком были ранее записаны.

Использовалось восемь видов заданий: четыре пространственного типа и четыре вербально-логического. Было по 60 конкретных реализаций каждого вида заданий, т. е. всего 480 заданий. Эксперимент проводился в две сессии (по 240 заданий в каждой сессии), в два дня. Примеры заданий показаны на рис. 1.

Задания состояли в следующем. Пространственные (рис. 1, *А*):

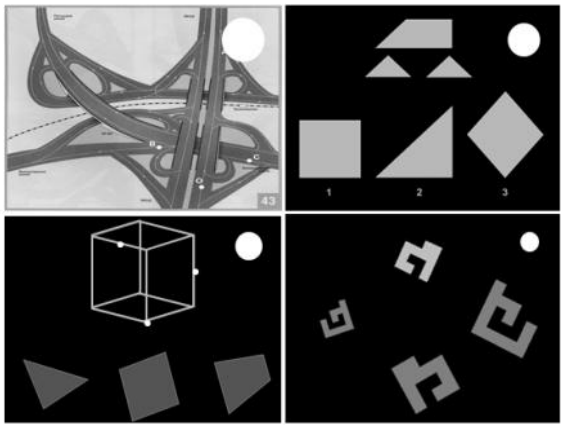
1. «Дорожная развязка». Найти единственно возможный вариант движения из точки О в одну из точек А, В или С согласно указанным стрелкам разрешенного движения. Наиболее пространственная задача – как по опросу испытуемых, так и по расположению в когнитивном пространстве.

2. «Сложная фигура». Собрать одну из фигур, представленных в нижней части экрана, из элементов, представленных в верхней части экрана.

3. «Сечение куба». Построить сечение куба плоскостью, проходящей через три указанные точки, и сопоставить полученную фигуру с одной из предъявленных в нижней части экрана.

4. «Вращение фигур». Подобрать к верхней фигуре одну из фигур в нижней части экрана, так чтобы они вместе образовали квадрат. Задача имеет наименьший уровень пространственности из всех представленных пространственных задач.

А



Б

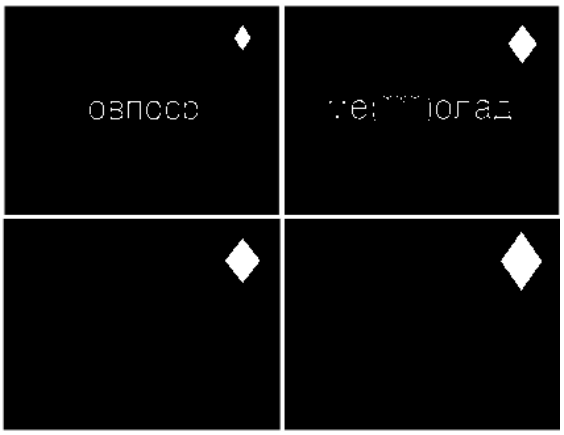


Рис. 1. Примеры задач, предъявляемых испытуемым: пространственные (*А*) и вербально-логические (*Б*)

Вербально-логические (рис. 1, *Б*):

5. «Анаграмма». Предъявляется существительное из 5 или 6 букв, которые перемешаны в случайном порядке. Необходимо угадать исходное слово.

6. «Сложное слово». Вместо звездочек подставить буквы, дающие конец первого и начало второго слова.

7. «Рита и Таня». Задание практически полностью идентично следующему.

8. «Петя и Вася». Определить истинность высказывания. Наиболее вербальная задача.

На рис. 1 в правом верхнем углу для каждой задачи указан символ, которым обозначается соответствующее когнитивное состояние на карте когнитивного пространства (у испытуемого на экране этих символов не было).

Процедура обработки сигнала ЭЭГ

Примененный процесс обработки сигнала ЭЭГ можно разделить на три этапа:

1) обучение классификатора (двухслойного перцептрона) по спектрам мощности ЭЭГ;

2) построение когнитивного пространства с помощью картирования Сэммона;

3) определение в реальном времени положения «рабочей точки сознания» (текущего когнитивного состояния испытуемого).

Первые два этапа осуществлялись вне реального времени. На первом этапе использовалась ЭЭГ, записанная в первый день эксперимента, а на втором и третьем этапе – записанная во второй день. Третий этап проходил в псевдореальном времени. Все процедуры проводились на индивидуальной основе, раздельно для каждого испытуемого. Иными словами, обучение классификатора, построение когнитивного пространства и работа «когновизора» осуществлялись для каждого человека отдельно и независимо.

Этап 1. На выборке ЭЭГ, записанной в первый день опыта, производится обучение на два класса 28 одинаковых перцептронов (28 – это число пар, которые могут образовать восемь заданий). В качестве обучающих векторов на входные элементы перцептрона подаются спектральные отсчеты мощности единичных реализаций ЭЭГ – для всех частот и всех отведений. Выход перцептрона состоит из двух элементов, каждый из которых ответствен за свой класс (классификация на два класса). Выходные элементы принимают реципрокные значения от 0 до 1 (т. е. если один элемент имеет значение, например, 0,2, то второй будет иметь значение 0,8). Выходной элемент с бóльшим значением активации обозначает распознанный класс.

Этап 2. Строится когнитивное пространство. Для этого вычисляются расстояния между заданиями на основе тестирования на перцептроне выборки ЭЭГ, полученной во второй экспериментальный день. В предыдущих наших работах [4] расстояния между когнитивными заданиями в пространстве спектральных характеристик ЭЭГ вычислялись как статистические индексы различия спектров мощности ЭЭГ. Было показано, что близкие по психологическим характеристикам когнитивные задания порождают близкие спектры мощности ЭЭГ и, наоборот, далекие по психологическим характеристикам задания вызывают появление мало похожих спектров. Этот факт позволяет говорить о том, что когнитивное пространство человека может быть построено на основе анализа ЭЭГ-данных.

В данном исследовании использовали перцептрон для определения расстояний между заданиями на основе анализа ритмов ЭЭГ. Идея состоит в следующем. Если входные векторы (т. е. единичные спектры мощности) в двух классах различаются мало, то классификация будет мало успешной и доля правильной классификации будет близка к случайному уровню, равному 0,5. Напротив, большие различия векторов в разных классах дадут хорошую классификацию. Например, «Дорожная развязка» и «Саша и Петя» будут распознаны на типичном для такого случая уровне порядка 0,9 [3, 4]. Следовательно, расстояние между заданиями можно оценить как долю правильного распознавания контрольной выборки за вычетом уровня случайной классификации 0,5 (на деле по практическим соображениям мы вычитали 0,4).

В соответствии с измеренными расстояниями задания располагаются на плоскости с помощью картирования Сэммона [5]. Суть алгоритма Сэммона состоит в том, чтобы расстояния на плоскости между значками, изображающими когнитивные состояния, как можно лучше соответствовали расстояниям, измеренным нами на основе анализа ритмов ЭЭГ.

Пример когнитивного пространства для одного из испытуемых можно увидеть на рис. 2, где уровень пространственности и вербальности задачи изображается формой и величиной значка (как и на рис. 1). Пространственные задания изображены в форме кругов, а вербальные – в форме ромбов, причем размер фигуры определяет степень пространственности или вербальности задания. «Дорожная развязка» является наиболее пространственной задачей и изображена большим кругом, а «Петя и Вася» – наиболее вербальной и изображена большим ромбом. Можно предположить, как мы это делали ранее [4], что на рис. 2 горизонтальная ось соответствует шкале «пространственность – вербальность». Что касается второй оси, то она в данном случае не очевидна. Однако обращает на себя внимание тот факт, что «жизненные» задачи («Дорожная развязка» и «Петя и Вася») расположены на плоскости выше, чем «искусственные». Возможно «жизненность» – это живые образы; тогда вертикальная ось соответствует шкале «образность», как это было в нашем предыдущем исследовании [4]. Разумеется, говорить об этом можно лишь на уровне спекуляций.

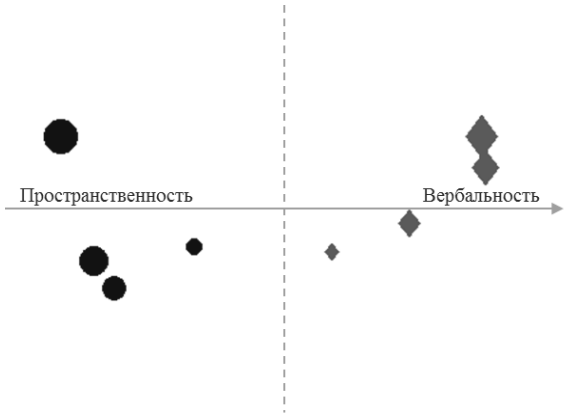


Рис. 2. Пример когнитивного пространства для одного из испытуемых

Построением когнитивного пространства для данного испытуемого заканчивается этап 2.

Этап 3 являет собой алгоритм слежения в реальном времени за мыслительной деятельностью человека с отображением ее хода на плоскости когнитивного пространства в виде «рабочей точки сознания».

На каждом шаге этого алгоритма на вход каждого из 28 классификаторов, предварительно обу-

ченных, как описано выше, подается единичный спектр мощности текущего 4-секундного отрезка ЭЭГ. В результате на каждом шаге мы получаем 28 чисел со значениями от 0 до 1, с помощью которых мы можем расположить рабочую точку в когнитивном пространстве. Это делается следующим образом.

Вначале находятся координаты 28 «промежуточных» точек (для каждой пары состояний) – числа на выходных элементах каждого классификатора делят пропорционально длину отрезка, соединяющего два состояния (рис. 3).

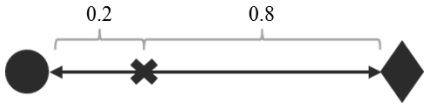


Рис. 3. Иллюстрация расположения «промежуточной» точки. Выходы перцептрона – 0,8 для вербальной задачи и 0,2 для пространственной. Точка отнесена к вербальному типу

Следующим шагом является определение «стороны» пространства, куда должна быть помещена рабочая точка в текущий момент, т. е. тип задач, к которому принадлежит задача: пространственный или вербально-логический. Выбор стороны производится с помощью подсчета количества «пространственных» и «вербальных» ответов 16 классификаторов между заданиями разного вида: выбирается та сторона, к которой было отнесено большее число промежуточных точек.

После определения стороны для дальнейшего рассмотрения берутся только промежуточные точки, расположенные между парами выбранной стороны – всего 6 точек. Далее из четырех возможных когнитивных состояний, относящихся к данной стороне, определяется наиболее подходящее состояние, а именно то, к которому промежуточные точки приближаются более всего. Таким образом, по входящему четырехсекундному отрезку спектра ЭЭГ определяется наиболее вероятный вид решаемой задачи.

Остается определить расположение рабочей точки на плоскости. Ее координаты находятся с помощью вычисления взвешенного среднего шести координат промежуточных точек выделенной стороны: большие веса (равные 2,0) отнесены к точкам, определенным между парами задач, включающими ранее выделенное наиболее вероятное состояние (всего 3 пары), а меньшие веса (равные 0,1) – к остальным точкам.

Описанный алгоритм весьма сложен и может показаться произвольным. Он был подобран опытным путем для обеспечения наиболее гладкой, устойчивой и надежной работы «когновизора».

Работа «когновизора»

Вышеописанный алгоритм был применен к последовательным 4-секундным отрезкам, поступающим на вход классифицирующей системы каждую секунду с перекрытием в 3 секунды (рис. 4). Рабочей точке также было придано свойство инерции, т. е. ее текущее местоположение учитывало 2 предшествующих. Это было сделано для того, чтобы сгладить ее движение по когнитивному пространству.

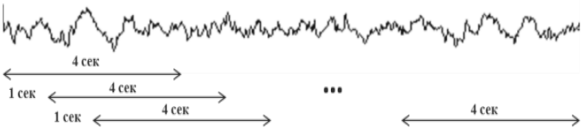


Рис. 4. Перекрывающиеся эпохи ЭЭГ

В реальной анимированной картине в когнитивном пространстве отображается только одна движущаяся рабочая точка, а на рис. 5 она обозначена крестиком в четырех положениях при поступлении на вход разных видов задач. В данном примере рабочая точка движется от положения 1 в положение 4, по пути проходя через промежуточные положения 1 и 2. Траектории движения рабочей точки на рис. 5 обозначены стрелками. Таким образом, раз в секунду происходит перемещение рабочей точки, что дает возможность в реальном времени наблюдать за ходом мыслительной деятельности.

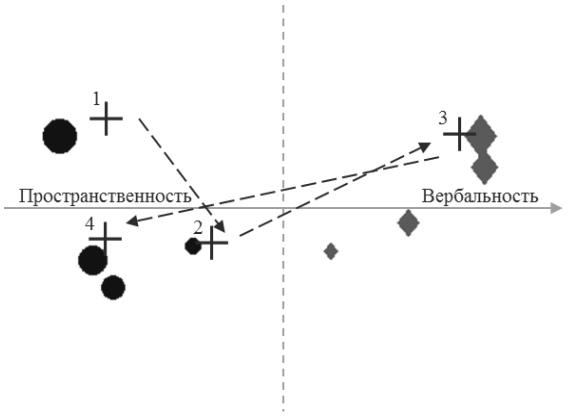


Рис. 5. Рабочая точка в когнитивном пространстве

Заключение

Полученный результат является предварительным. Создан действующий макет «когновизора». Реальная система, которая, как мы предполагаем, будет использоваться прежде всего как исследовательский инструмент, должна сильно отличаться от макета.

Цель данной работы – продемонстрировать, что предложенная технология работает на практике. Мы сознаем, что статья не удовлетворяет строгим критериям научности. Эти критерии предполагают статистическую оценку результата. Так, например, мы должны были бы ввести количественный критерий того, что рабочая точка показывает «правильное» когнитивное состояние. Затем на основе достаточно большой выборки данных найти процент времени, когда «когновизор» определяет осуществляемую деятельность правильно, и, используя адекватный количественный критерий, оценить эффективность работы нового при-

бора. Этого сделано не было. В то же время результат достаточно предсказуем, поскольку задача классификации коротких перекрывающихся отрезков ЭЭГ в режиме off-line решалась нами неоднократно, а надежность распознавания была при этом около 90 %.

То, как работает «когновизор», лучше всего видно в анимации, в которой рабочая точка в псевдореальном времени «путешествует» в когнитивном пространстве между выполняемыми заданиями. Формат сборника не позволяет читателю увидеть эту анимацию, но нам, авторам, она кажется достаточно убедительной. Наблюдая за анимацией, мы обнаружили один интересный эффект. Довольно часто рабочая точка подходит к «правильному» когнитивному состоянию (соответствующему решаемому заданию), но неожиданно на непродолжительное время возвращается к предыдущему заданию, а затем снова «приплывает» к текущему. Это соответствует самоотчету испытуемых, которые рассказывают, что иногда возвращаются к предыдущему заданию, чтобы «дорешать» его, если не успели до конца выполнить его или не уверены в правильности ответа. Таким образом, получается, что даже предварительный макет устройства позволил увидеть скрытую особенность мышления.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-04-04449-а и Программы президиума РАН 1.26П.

Литература

1. *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.

2. *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. С. 20–28.

3. *Иваницкий Г.А., Наумов Р.А., Роик А.О., Иваницкий А.М.* Как определить, чем занят мозг, по его электрическим потенциалам? Устойчивые паттерны ЭЭГ при выполнении когнитивных заданий // Вопросы искусственного интеллекта. 2008. Т. 1. С. 93–102.

4. *Роик А.О., Иваницкий Г.А., Иваницкий А.М.* Когнитивное пространство человека: совпадение моделей, построенных на основе анализа ритмов мозга и на психометрических измерениях // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2012. Т. 98, № 11. С. 1314–1328.

5. *Sammon J.W.* A nonlinear mapping for data structure analysis // IEEE Transactions on Computers. 1969. V. 18. P. 401–409.

6. *Wolpaw J.R., McFarland D.J., Vaughan T.M.* Brain-computer interface research at the Wadsworth center // IEEE Trans. Rehab. Eng. 2000. V. 8. P. 222–226.

7. *Peters B.O., Pfurtscheller G., Flyvbjerg H.* Automatic differentiation of multichannel EEG signals // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2001. V. 48. P. 111–116.

8. *Bobrov P., Frolov A., Cantor C., Fedulova I., Bakhnyan M., Zhavoronkov A.* Brain-computer interface based on generation of visual images // PLoS One. 2011. V. 6 (6). Art. 20674.

9. *Wang Q., Sourina O.* Real-time mental arithmetic task recognition from EEG signals // IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering : a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2013. V. 21. P. 225–232.

10. *Mitchell T.M., Hutchinson R., Niculescu R.S., Pereira F., Wang X.* Learning to decode cognitive states from brain images // Machine Learning. 2004. V. 57. P. 145–175

.

Особенности зрительно-моторной активности при просмотре аффективных изображений с разной эмоциональной валентностью

С.В. Камратов [1], А.В. Полевая [1], С.А. Полевая [1,2]

[1] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2] Нижегородская государственная медицинская академия

Введение

Изучение эмоций было и остается интересной и вместе с тем сложной темой исследований. Одной из проблем является выбор стимульного материала для проведения экспериментов [1, 2]. В настоящее время в психофизиологии широко используется база эмоциональных стимулов IAPS [3], которую подготовил Центр изучения эмоций и внимания из Университета Флориды (Center for the Study of Emotion and Attention (University of Florida, Gainesville, FL).

Одним из актуальных направлений в изучении эмоций является поиск физиологических коррелятов и детектирование эмоций по объективным данным, полученным неинвазивными методами. В нашей работе представлены результаты измерения зрительно-моторных паттернов при просмотре изображений различной эмоциональной валентности (нейтральных, позитивных и негативных) методом Eye Tracking. На основании исследований, показавших информативность некоторых параметров окуломоторики [4, 5], для контроля взяты «длительность фиксаций» и «размер зрачка». В качестве базы эмоциональных стимулов нами была выбрана база IAPS, подготовленная Center for the Study of Emotion and Attention (CSEA).

Методы

В качестве стимульного материала в соответствии со значениями по шкале «удовольствие» (P(IAPS)) было выбрано 10 изображений: позитивных (P(IAPS) > 0) и негативных (P(IAPS) < 0). Таким образом, создана возможность для оценки влияния эмоциональной валентности изображений на траекторию осмотра.

Для регистрации зрительно-моторной активности (ЗМА) при просмотре аффективных изображений применен программно-аппаратный комплекс Eye Tracker SMI iView XTM Hi-Speed 1250, обеспечивающий высокоточный мониторинг движений глаз при работе с визуальными стимулами: скорость опроса 1250 Гц при времени обработки менее 0,5 мс, разрешение по пространству 1680×1050, были получены значения длительности фиксаций и размера зрачка, измеренные в миллисекундах и пикселях соответственно.

Контент для регистрации ЗМА состоял из 4 последовательных элементов: инструкции, слайда с задачей на произвольное внимание для стандартизации состояния перед просмотром, изображения IAPS, оценочных шкал.

Результаты

В исследовании приняли участие 18 человек (14 женщин и 4 мужчин, возраст от 19 до 26 лет).

На первом этапе проведено сопоставление оценок изображений участниками исследования по шкале «удовольствие» (валентности аффективных изображений) с оценками, содержащимися в библиотеке IAPS.

Установлено, что все изображения, которые у наших респондентов вызывают отрицательные эмоции, имеют отрицательную оценку в базе IAPS. Аналогичная ситуация наблюдается по отношению к изображениям с положительной валентностью: все изображения, которые у наших респондентов вызывают положительные эмоции, имеют положительную оценку в базе. Средняя оценка изображений по шкале «удовольствие» (P, валентность) наших респондентов линейно связана со средним значением для этих же изображений в базе IAPS (рис. 1).

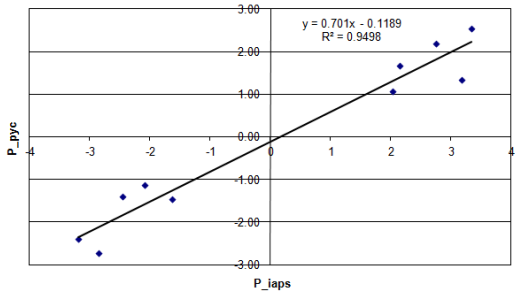


Рис. 1. Сопоставление оценок изображений участниками исследования по шкале «удовольствие» (валентности аффективных изображений) с оценками, содержащимися в библиотеке IAPS. По оси *X* – оценки по шкале «удовольствие» в базе IAPS (P_iaps); по оси *Y* – оценки по шкале «удовольствие» наших респондентов (P_рус)

Если в соответствие каждому изображению поставить распределение прецедентов по шкале «удовольствия» от –4 до +4, то возникает возможность оценить уровень негативности (отрицательный компонент) и уровень позитивности (положительный компонент) каждого стимула. Связь между положительным и отрицательным компонентами эмоциональных образов имеет логарифмический характер (рис. 2). При этом чем больше абсолютное значение по шкале «удовольствие» в базе IAPS, тем выше вероятность моновалентного эмоционального образа. Только для 4 стимулов обнаружена доминирующая валентность: для IAPS 3059 (P_iaps = –3,19) и IAPS 6022 (P_iaps = –2,73) доминировала отрицательная валентность; для IAPS 7502

(P_iaps = 2,75) и IAPS 1710 (P_iaps = 3,34) доминировала положительная валентность (рис. 3).

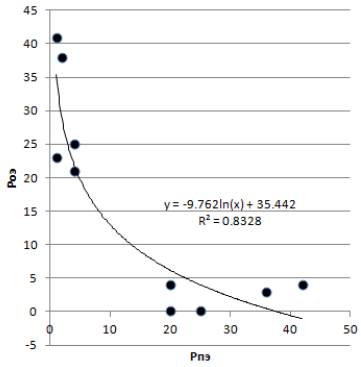


Рис. 2. Связь между отрицательными и положительными компонентами эмоциональных образов, связанных с просмотром аффективных изображений

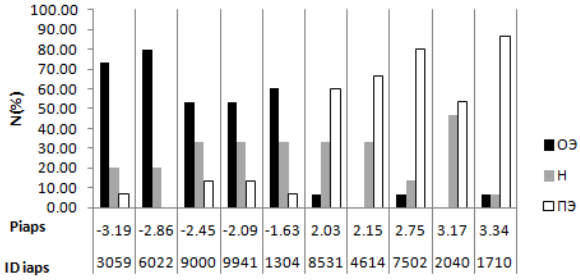


Рис. 3. Вероятность положительных, отрицательных и нейтральных эмоциональных отображений стимулов из базы IAPS

Разница в валентности изображений проявилась в особенностях зрительно-моторной активности при просмотре (рис. 4).

А *Б*

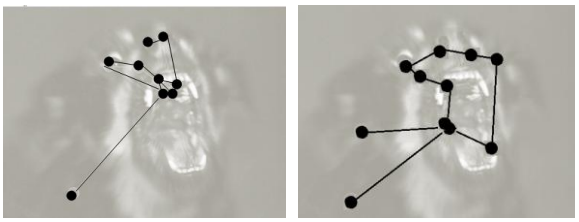


Рис. 4. Траектории осмотра изображения, связанные с эмоционально значимыми (*А*) и нейтральными (*Б*) отображениями одного и того же изображения

В параметрах зрительно-моторной активности выявлены значимые эффекты, связанные с валентностью эмоционального образа (рис. 5, таблица).

Параметры зрительно-моторной активности, связанной с разной валентностью эмоционального образа изображений IAPS

Валентность	Длительность фиксаций, мс	Размер зрачка, пиксель
Нейтрально	313,89±16,38	30,75±0,19
Отрицательная	262,29±6,83	32,52±0,18
Положительная	274,81±9,35	30,86±0,18

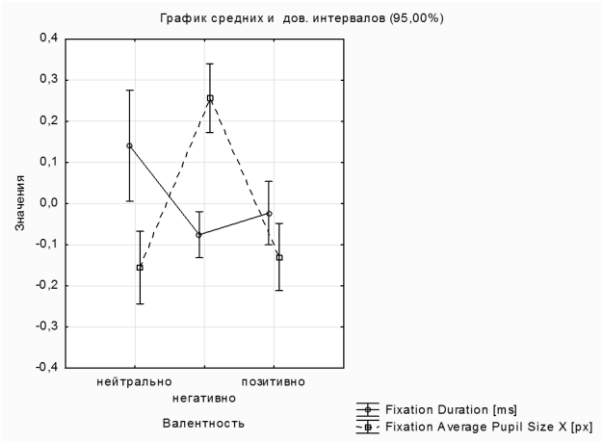


Рис. 5. Особенности зрительно-моторной активности, связанной с разной валентностью эмоционального образа

Для каждой валентности эмоционального образа существует специфическое распределение значений по параметрам «диаметр зрачка» – «длительность фиксаций»:

- для «нейтральных» изображений зарегистрирована максимальная продолжительность фиксаций, что свидетельствует о субъективной сложности принятия решения [6], при этом диаметр зрачка такой же, как при просмотре «позитивных» изображений, и меньше, чем при просмотре изображений с «негативной» валентностью;
- при просмотре «позитивных» изображений короткое время фиксаций сочетается с маленьким диаметром зрачка;
- для «негативных» изображений зарегистрировано максимальное значение диаметра зрачка, что свидетельствует об активации симпатической нервной системы и повышении тревожности, при этом продолжительность фиксаций такая же, как при просмотре «позитивных» изображений.

Информативна динамика каждого из параметров. Детектировать эмоциональную значимость изображения можно по продолжительности фиксаций: удлинение фиксаций свидетельствует о росте неопределенности и повышении субъективной сложности восприятия. Детектировать негативность воздействия изображения можно по диаметру зрачка: увеличение диаметра свидетельствует о росте напряжения регуляторных систем и повышении тревожности.

Таким образом, анализ зрительно-моторной активности при просмотре визуального контента может быть основой надежной и чувствительной экспертной системы для детектирования эмоций, связанных с событиями в виртуальной реальности.

Заключение

База аффективных изображений IAPS является уникальным инструментом для изучения физиологических коррелятов эмоций. Несмотря на то что эмоциональное отображение стимулов отличается у разных людей, средняя оценка валентности изображения у наших респондентов линейно связана с оценками этих изображений в базе IAPS.

Важно, что валентность средних оценок по шкале «удовольствие» у наших респондентов аналогична валентности оценок, полученных на американской выборке [7, 8].

Анализ связи между траекторией осмотра аффективного изображения и эмоциональной валентностью указывает на возможность применения eye-tracking-метода для детектирования эмоций, вызываемых визуальными образами.

Литература

1. *Lang M.M., Bradley P.J.* Handbook of Psychophysiology. 2nd Edition. N. Y. : Cambridge University, 2006. P. 581–607.

2. *Васанов А.Ю., Марченко О.П., Машанло А.С.* Проверка стандартных показателей эмоционально окрашенных фотоизображений IAPS на русской выборке // Экспериментал. психология. 2011. Т. 4, № 3. С. 126–132.

3. *Lang M.M., Bradley P.J., Cuthbert B.N.* International affective picture system (IAPS) : Affective ratings of pictures and instruction manual. Gainesville, FL : University of Florida, 2008. P. 1–12.

4. *Tavakoli H.R., Atyabi A., Rantanen A., Laukka S.J., Nefti S.* Predicting the Valence of a Scene from Observers' Eye Movements // PLoS One. 2015. P. 1–19.

5. *Raudonis V., Dervinis G., Vilkauskas A., Paulauskaite A., Kersulyte G.* Evaluation of Human Emotion from Eye Motions // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2013. P. 79–84.

6. *Демарева В.А., Полевая С.А., Парин С.Б.* Поиск информативных параметров данных Eye Tracking для оценки уровня знания английского языка // Экспериментальный метод в структуре психологического знания. М., 2012. С. 448–451.

7. *Величковский Б.М.* Когнитивная наука : основы психологии познания. М. : Смысл, 2006. С. 432.

8. *Величковский Б.Б., Румянцев М.А., Морозов М.А.* Новый подход к проблеме «прикосновения Мидаса»: идентификация зрительных команд на основе выделения фокальных фиксаций // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 14, Психология. 2013. № 3. С. 33–45.

Обнаружение частот Пица в когнитивных процессах

В.А. Коломбет

Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, г. Пущино, Московская область

В физическом мире большую роль играют колебания, волны, вращения и прочие периодические процессы. В последнее время выясняется, что между такими процессами существуют ранее неизвестные соотношения, обнаруживаются системы ритмов, выстраивающиеся в определенные каскады. Каскады универсальной системы удваивающихся и утраивающихся периодов (УСУУП) колебательных процессов в различных динамических системах связаны в теории динамических систем с именами М. Фейгенбаума и, соответственно, А.И. Гольберга, Я.Г. Синая, К.М. Ханина (ГСХ) [1, 2]. Большую работу в области феноменологии каскадов удваивающихся периодов самой различной природы выполнил Рей Томес (Новая Зеландия) [3]. Феноменологические особенности каскадов утроения были описаны в СССР и Германии Хартмутом Мюллером [4], а в США Стивеном Пицем с единомышленниками [5].

Область периодов, исследованная в работе [5], приходится на периоды от десятков лет до миллионов и даже миллиарда лет. Статья [6] была первым шагом проверки результатов, полученных С. Пицем с коллегами. Исследование области коротких периодов, т. е. высоких частот, показало, что формула Пица

$$T_{k,\,n} = 114{,}6 \cdot 3^k/n \text{ [лет]},$$

где целочисленный параметр k располагается в диапазоне от 0 до 15, а n = 1 и 2, описывает не только представленные в статье [5] астрофизические, физические, геофизические и биофизические длиннопериодные феномены различной природы. Большой интерес для исследователя представляют также периодические процессы в функционировании нервной системы человека и животных. Поскольку нервная система эволюционировала в физическом мире, обладающем вышеуказанными ритмическими свойствами, следует проверить, не проявится ли формула Пица в ее ритмике? Оказалось, что утроение периодов в согласии с формулой Пица демонстрирует, например, слуховой аппарат человека. Описанная в работе [6] связь ширины диапазона слуха с музыкальными нотами иллюстрируется на рис. 1. В диапазон частот 20 Гц – 20 кГц, доступный слуху человека, попадает семь пар частот Пица, и это определяет существование именно семерки главных нот – до, ре, ми, фа, соль, ля и си. Если диапазон слуха простирался бы, например, до 60 кГц, то в каждой октаве клавиатуры рояля была бы восьмая белая нота, хотя количество нот в октаве осталось бы прежним, так как оно определяется обстоятельством, не связанным с частотами Пица.

Частоты Пица при n = 1 и 2 в частотном диапазоне слуха человека формируют семь пар, и, как оказалось, семь базовых нот попадают в середины этих пар при принятой сейчас настройке ля первой октавы на 440 Гц. Точное попадание в середины «пар Пица» (см. рис. 1) возникнет при настройке на 430–432 Гц; это известная так называемая классическая настройка музыкальных инструментов.

Исследование, в частности, такого адаптированного к слуху человека устройства, как фортепиано, показало, что следы существования УСУУП проявились даже в нем [6, 7]. Следом были исследованы приборы для УВЧ-терапии и диатермии: оказалось, что они работают на частотах, предсказываемых формулой Пица [8]. К этому моменту уже накопилось достаточно оснований для предположения, что та же система частот Пица будет обнаружена даже в чисто технических системах. И действительно, оказалось, например, что частоты современных компьютерных процессоров тяготеют к частотам Пица, а частоты мобильной телефонии и каналов телевещания, наоборот, избегают частот Пица [9–11]. Таким образом, закону Пица одинаково подчиняются как природные, так и технические эволюционирующие системы. Естественно, что встает ряд актуальных вопросов, в том числе вопрос о природе частот Пица. В настоящее время по этому поводу уже сформулированы первые шаткие гипотезы. Они далеко выходят за пределы обычных представлений биологии или техники и не будут здесь обсуждаться.

Параметр n был трансформирован Пицем к виду 2^m, где m – ноль или небольшое натуральное число. Это было сделано для улучшения соответствия формулы Пица наблюдаемым экспериментальным данным в области астрономических периодов. В результате этого усовершенствования формула Пица стала заметно изящнее:

$$(T_{k,\,m} / T_0) = 3^k/2^m,$$

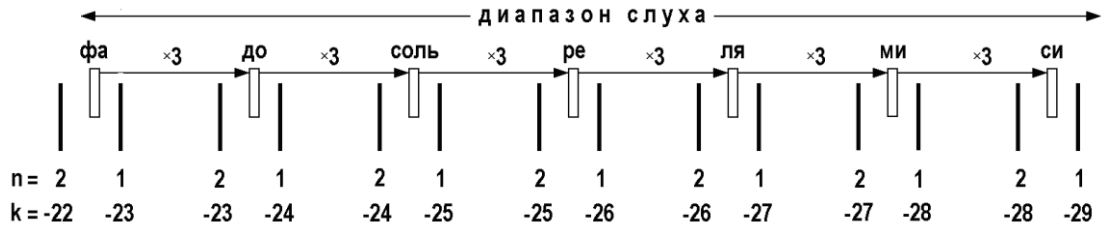


Рис. 1

где T_0 = 114,6 года. Новая формула Пица связывает каскады «уполовинивания» (Фейгенбаума – Томеса?) с каскадами утроения (ГСХ – Мюллера – Пица?).

Необходимость использования уточненной формулы Пица в области высоких частот была осознана, когда в процессе изучения инфрадианных (многодневных) биоритмов различных биохимических и физиологических параметров человека и животных, а также изучения зрения человека были обнаружены периоды, не описываемые первой формулой Пица, но прекрасно описываемые второй [12, 13]. Оказалось, например, что частота главного (палочкового, ахроматического) зрения человека (пигмент родопсин) настроена на главную (единственную с нулевым параметром m) для оптического диапазона частоту Пица; все три частоты цветного (колбочкового, пигменты йодопсины) зрения человека тоже настроены на частоты Пица; частота, на которую настроены фоточувствительные нервные клетки сетчатки глаза человека, позволяющие отличать свет от тьмы (пигмент меланопсин), тоже оказалась одной из частот Пица; так в итоге сложилась компактная картина предельно отлаженного биологической эволюцией механизма распознавания освещенных объектов глазом человека. Объединение этих достижений в единую картину привело к понятию «сеть Пица»: в координатах «логарифм длины волны – параметр m» частоты Пица $T_{k,m}$ выглядят узлами равномерной сетки.

На рис. 2 показаны максимумы в спектрах поглощения палочек, колбочек и фоточувствительных нервных клеток сетчатки глаза человека, которые определяются уточненной формулой Пица. Узел «сети Пица» при m = 0 отвечает сумеречному зрению, т. е. палочкам сетчатки, узлы при m = 3, 11 и 5 – красным, зеленым и синим колбочкам соответственно, а узел при m = 8 – фоточувствительным нервным клеткам сетчатки глаза человека. По вертикальной оси – длина волны света; зачернены диапазоны длин волн света, плохо различимого глазом человека. Максимумы спектров поглощения фотопигментов глаза человека (родопсина, йодопсинов и меланопсина) лежат в области максимума интенсивности света, приходящего к земной поверхности.

Поскольку периоды Пица, как оказалось, широко распространены в природе, можно ожидать, что они проявятся не только в области слуха (рис. 1) и зрения (рис. 2) человека, косвенно связанных с когнитивными процессами, но и в ходе самих когнитивных процессов. Об обнаружении у человека трудно интерпретируемых осцилляций параметров памятного следа неоднократно сообщал А.Т. Бондарь, и наконец в работе [6] была окончательно установлена связь этих осцилляций с периодами Пица.

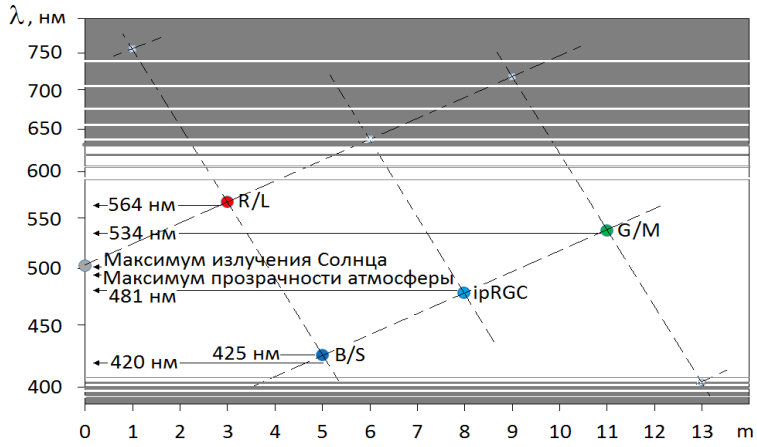


Рис. 2

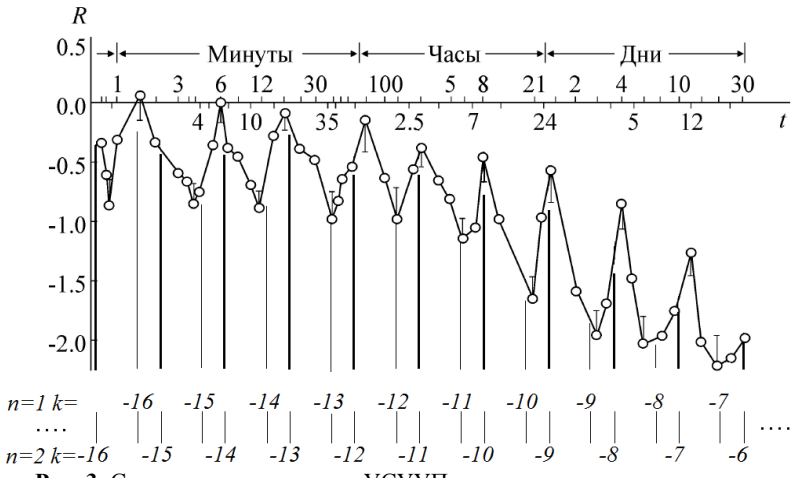


Рис. 3. След проявления частот УСУУП в механизме памяти человека

На рис. 3 представлены обнаруженные А.Т. Бондарем осцилляции эффективности воспроизведения запомненной информации (ось ординат: условные единицы) с ростом интервала времени между моментами запоминания и воспроизведения информации (ось абсцисс: интервал времени). В нижней части рисунка приведен соответствующий фрагмент УСУУП. Каждый всплеск качества памяти связан с периодом Пица при $n = 2$, а каждое «помрачение» памяти – с периодом при $n = 1$.

По мере увеличения параметра m роль частот Пица должна падать, поскольку в противном случае суммарная интенсивность УСУУП окажется бесконечной. И действительно, яркое проявление на рис. 3 частот Пица только с $m = 0$ и $m = 1$ (т. е. с $n = 1$ и $n = 2$) свидетельствует о быстром снижении роли частот Пица с ростом параметра m. Эту же закономерность иллюстрирует рис. 1, где видно, что слух человека (по крайней мере, музыкальный) тоже различает лишь два главных значения параметра n: 1 и 2. Максимальное обнаруженное значение параметра m у частоты Пица равно 11; это интенсивный желто-зеленый свет.

Литература

1. *Feigenbaum M.* Quantitative universality for a class of nonlinear transformations // J. Stat. Phys. 1978. V. 19. P. 25–52.

2. *Гольберг А.И., Синай Я.Г., Ханин К.М.* Универсальные свойства для последовательностей бифуркаций утроения периода // Успехи математических наук. 1983. Т. 38, вып. 1(229). С. 159–160.

3. http://cyclesresearchinstitute.org/subjects/cycles-astronomy/.

4. *Muller H.* Fractal scaling models of resonant oscillations in chain systems of harmonic oscillators // Progress in Physics. 2009. V. 2. P. 72–76.

5. *Puetz S.J., Prokoph A., Glenn B., Mason E. W.* Evidence of synchronous, decadal to billion year cycles in geological, genetic, and astronomical events // Chaos, Solitons & Fractals. 2014. V. 62/63. P. 55–75.

6. *Бондарь А.Т., Федоров М.В., Коломбет В.А.* Утраивающиеся периоды в мультимасштабных физических и биологических явлениях // Биофизика. 2015. Т. 60(6). С. 1208–1215.

7. *Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В.* О перспективе применения фундаментальной системы утраивающихся периодов в мультимасштабных технических устройствах // Известия Института инженерной физики. 2016. № 1(39). С. 8–11.

8. *Коломбет В.А., Лесных В.Н., Скавуляк А.Н., Коломбет Е.В., Бондарь А.Т.* Проявление универсальной системы утраивающихся периодов в УВЧ-терапии // Известия Института инженерной физики. 2017. № 2(44). С. 70–73.

9. *Коломбет В.А., Коломбет Е.В., Лесных В.Н.* Предсказание тактовой частоты процессора будущего поколения компьютеров как пример эффективности использования в технике свойств фрактальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики. 2016. № 2(40). С. 55–58.

10. *Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Федоров М.В.* Обнаружение в технических устройствах фрактальной системы утраивающихся периодов, известной по своим физическим, геофизическим, биофизическим и биологическим манифестациям // Биофизика. 2016. Т. 61(3). С. 615–624.

11. *Коломбет Е.В., Лесных В.Н., Коломбет В.А.* Особенности проявления фрактальной системы утраивающихся периодов в телевещании и мобильной телефонии // Известия Института инженерной физики. 2016. № 4(42). С. 20–24.

12. *Коломбет В.А., Лесных В.Н.* Универсальная система утраивающихся периодов как возможный индикатор дробления времени, сопровождающего эволюцию Вселенной // Материалы конференции «Физика пространства и времени». Муром, 2017. С. 17–20.

13. *Диатроптов М.Е.* Морфофункциональные параметры эндокринной и иммунной системы и пролиферативная активность эпителия в инфрадианном диапазоне биоритмов : автореферат дис. … докт. биол. наук. 2015. 36 с.

Исследование преобразований периодического внешнего сигнала в модели таламокортикальной ячейки

А.В. Колосов[1,2], И.В. Нуйдель[2]

[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
7418880@mail.ru,
[2]Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
nuidel@appl.sci-nnov.ru

Введение

Задача изучения различных динамических режимов в системе связанных пороговых элементов до сих пор остается актуальной. Это связано с тем, что большинство моделей нейронных элементов можно разделить на два класса: нейроны-детекторы (или пороговые нейроны) и нейроны-пейсмейкеры (спайковые нейроны). Сети из пороговых нейронов обладают способностью функционировать в колебательном режиме за счет взаимодействия нейронов или нейронных ансамблей [1].

Подробного исследования режимов сосредоточенной модели взаимодействия пороговых элементов со структурой связей по типу «таламокортикальной ячейки» (восходящие связи для сенсорных сигналов возбуждающие, обратные, управляющие, – тормозные, что необходимо для реализации механизма прерывания сенсорного сигнала [2]) ранее не проводилось.

Оказалось, что даже точечная математическая модель элементарной ячейки из трех взаимодействующих нейроноподобных ансамблей (в качестве конкретного примера были выбраны: таламус, ретикулярные ядра таламуса и кора) содержит ряд новых особенностей в динамических режимах реагирования в ответ на поступление на ее вход внешнего сенсорного сигнала.

Модель и результаты

Рис. 1. Схема функциональных связей между основными нейроноподобными подсистемами в таламокортикальной ячейке

Структурная схема таламокортикальной ячейки представлена на рис. 1. Известно, что таламокортикальные ячейки связаны между собой через ансамбли нейронов коры головного мозга [3–5].

Настоящая работа ориентирована на исследование системы связанных нелинейных пороговых элементов, каждый из которых соответствует следующим структурам мозга: кора, таламус, ретикулярные ядра таламуса [6].

Сосредоточенная математическая модель ячейки, соответствующая схеме на рис. 1, описывается системой дифференциальных уравнений (ДУ)

$$\frac{dU_1}{dt} = -\frac{U_1}{\tau_1} + k_1 \cdot F_1[-T_1 + k_{ex}U_{ex} - k_{13}U_3]\,, \quad (1)$$

$$\frac{dU_2}{dt} = -\frac{U_2}{\tau_2} + k_2 \cdot F_2[-T_2 + k_{21}U_1 + k_{22}U_2]\,, \quad (2)$$

$$\frac{dU_3}{dt} = -\frac{U_3}{\tau_3} + k_3 \cdot F_3[-T_3 + k_{32}U_2], \quad (3)$$

где U_1, U_2, U_3 – усредненная активность нейронов выбранных участков таламуса, коры и ретикулярных ядер таламуса соответственно; τ_i – характерное время затухания активности в соответствующих нейронных ансамблях; k_i – амплитуда генерации импульсной активности соответствующими нейронными ансамблями; T_i – усредненные величины для порогов возбуждения соответствующих нейронных ансамблей; U_{ex} – входной сигнал, поступающий на таламус; k_{ij} – коэффициенты взаимной связи между подсистемами в таламокортикальной ячейке; $F_i[\,]$ – ступенчатообразные функции, крутизна которых характеризует разброс величин порогов около усредненных значений в рассматриваемом ансамбле (другое название: функции энергообеспечения), в квадратных скобках – аналог постсинаптического потенциала (ПСП) на мембранах соответствующих ансамблей нейронов [3].

Целью данной работы являлось рассмотрение поведения системы при подаче внешнего переменного сигнала. Чтобы проследить отклики системы на переменный внешний сигнал, выявить, где система работает в режиме вынужденных колебаний, а где в режиме автоколебаний, в систему было введено затухание. Один из способов ввести затухание в систему – заменить резкие пороговые функции $F_i[\,]$ на функции с линейным участком перехода (рис. 2). Далее будем называть данные функции функциями энергообеспечения. Длину линейного участка функции энергообеспечения обозначим d.

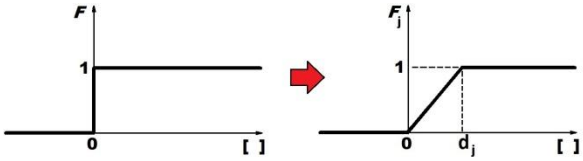


Рис. 2. Переход к функции энергообеспечения с линейным участком перехода ($d = 0; d > 0$)

Ранее было показано, что длительность первого импульсного отклика на постоянный внешний сигнал подчиняется определенной закономерности (U-образной зависимости от внешнего сигнала). Это справедливо, если рассматривать первый импульс вместе с «паузой» после него до начала автоколебаний.

Обозначим измеренную таким образом длительность как T_1^B. Для объяснения поведения системы при отклике на квазипериодический внешний сигнал удобно измерять величину T_1^A – длительность первого импульса до паузы.

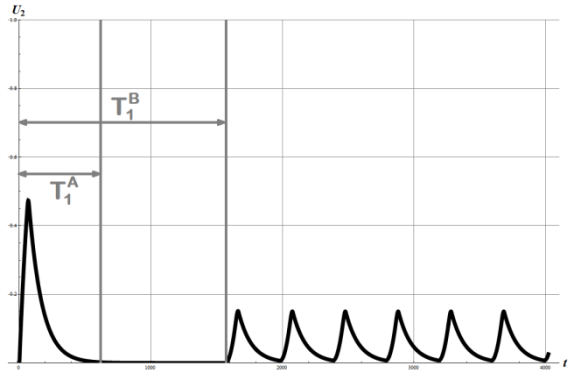


Рис. 3. Пояснения измерений длительности первого импульса

Была аналитически получена зависимость введенной величины T_1^A от величины постоянного внешнего сигнала при рассмотрении задачи с параметрами

$$k_j = 1/\tau_j;\ k_{ex} = 0,001;\ \tau_1 = 10;\ \tau_2 = 100;$$
$$\tau_3 = 1000;\ T_1 = 0;\ T_2 = 1;\ T_3 = 0,5;$$
$$k_{13} = 1;\ k_{21} = 2;\ k_{32} = 1;\ k_{22} = 0.$$

Сама зависимость имеет вид

$$T_1^A \sim \tau_3 \cdot \ln \frac{1}{k_{ex}(U_{ex\max} - U_{ex})}. \qquad (4)$$

Для наглядности она графически продемонстрирована на рис. 4.

Так как длительность первого импульса системы зависит от амплитуды внешнего сигнала (увеличивается с ростом амплитуды), это объясняет то, что при большой частоте внешнего сигнала и большой амплитуде автоколебания не успевают начаться, и мы видим только вынужденные колебания огибающей. Таким образом, вынужденность колебаний зависит не только от частоты внешнего сигнала, но и от амплитуды.

Чтобы учесть не только частоту внешнего сигнала, но и его амплитуду при установлении вынужденности / автоколебательности системы, нужно сравнивать период внешнего сигнала с длительностью первого импульса T_1^A, зависимость которого от амплитуды известна. Тогда можно выделить два режима.

- При периоде внешнего сигнала $T_{ex} > T_1^A$, где T_{ex} – период внешнего сигнала, огибающая – вынужденная, заполнение – автоколебания (рис. 5).
- При $T_{ex} < T_1^A$ огибающая – автоколебания, заполнение – вынужденные колебания (рис. 6).

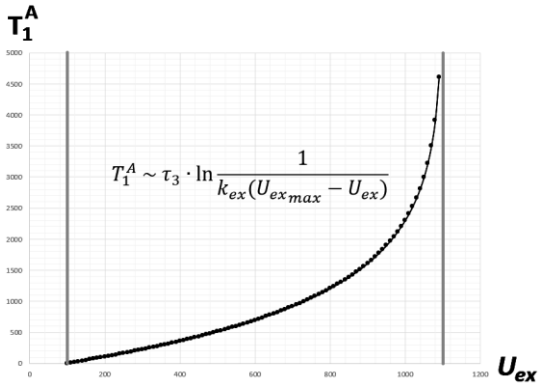


Рис. 4. Зависимость T_1^A от величины постоянного внешнего сигнала

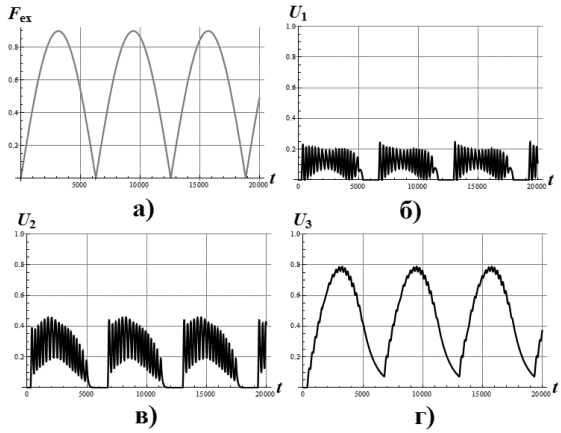


Рис. 5. Отклики системы на внешний сигнал низкой частоты ($T_{ex} > T_1^A$): *а* – внешний сигнал, *б* – отклики таламуса, *в* – отклики коры, *г* – отклики ретикулярных ядер

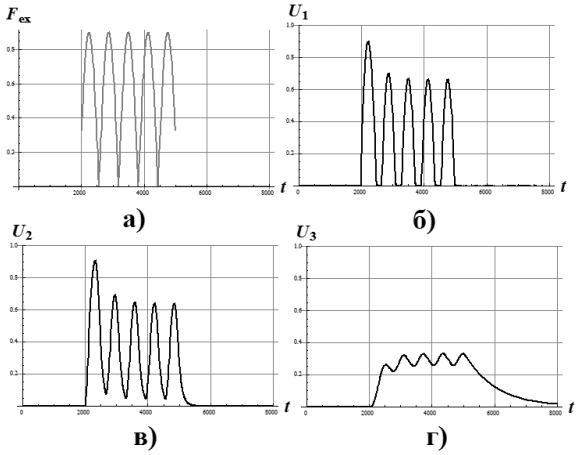


Рис. 6. Отклики системы на внешний сигнал высокой частоты ($T_{ex} < T_1^A$): *а* – внешний сигнал, *б* – отклики таламуса, *в* – отклики коры, *г* – отклики ретикулярных ядер

Чем меньше T_{ex}, тем меньше амплитуда вынужденных колебаний заполнения, и можно называть это «сглаживанием». При уменьшении T_{ex} быстрее сглаживается сигнал ретикулярных ядер, затем коры, и в итоге таламуса. Это происходит потому, что для сигнала ретикулярных ядер внешним сигналом выступает сигнал с коры, а для сигнала коры – сигнал с таламуса (рис. 7).

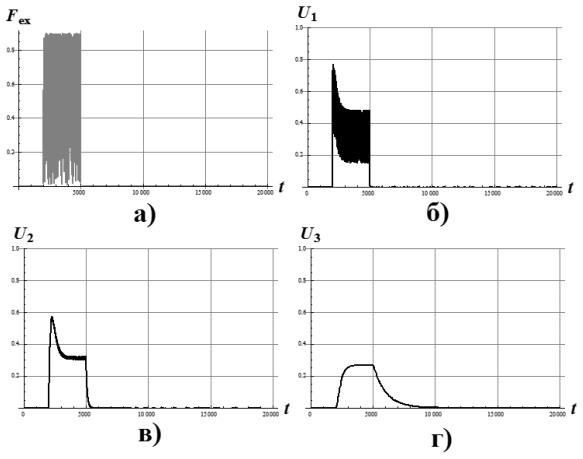


Рис. 7. Отклики системы на внешний сигнал очень большой частоты ($T_{ex} < \tau_1, \tau_2$): *а* – внешний сигнал, *б* – отклики таламуса, *в* – отклики коры, *г* – отклики ретикулярных ядер

Выводы

В ходе численного анализа были сделаны выводы о том, что происходит с системой, если менять наклон функции энергообеспечения.

- Затухание автоколебаний заполнения определяется параметром наклона *d* функции *F*[ ]: чем меньше *d*, тем медленнее затухают колебания.
- Также при увеличении *d* уменьшается амплитуда откликов системы в целом.
- При энергетическом обеднении таламуса (увеличении его *d* при постоянных *d* для коры и ретикулярных ядер) уменьшается амплитуда откликов коры и колебания затухают быстрее. Длительность макроимпульсов (импульсов огибающей) сокращается.
- При энергетическом обеднении коры (увеличении ее *d* при постоянных *d* для таламуса и ретикулярных ядер) уменьшается амплитуда откликов коры и колебания затухают быстрее. Длительность макроимпульсов (импульсов огибающей) не сокращается.
- При энергетическом обеднении ретикулярных ядер таламуса (увеличении их *d* при постоянных *d* для таламуса и коры) увеличивается амплитуда откликов коры и колебания затухают быстрее. Длительность макроимпульсов (импульсов огибающей) не сокращается.

С изменением функции энергообеспечения (*F*[]) в модели меняется срабатывание нейронов. Функция энергообеспечения определяется запасом АТФ в нейронах соответствующего модуля (коры, таламуса, ретикулярных ядер). Вид функции связан со сложным механизмом накопления (обеднения) АТФ, зависящим от изменения концентрации нейромодуляторов в синаптических контактах нейронов модулей (локальное изменение функции) или от влияния глии на нейронную активность модулей в целом (глобальное изменение функции).

Авторы выражают глубокую признательность В.Г. Яхно за обсуждение и продвижение результатов работы на всех ее этапах. Работа поддержана программой президиума РАН «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики».

Литература

1. *Ashwin P., Coombes S., Nicks R.* Mathematical Frameworks for Oscillatory Network Dynamics in Neuroscience // J. Mathematical Neuroscience. 2016. V. 6. P. 1–92.

2. *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.

3. *Яхно В.Г.* Модели нейроноподобных систем. Динамические режимы преобразования информации // Нелинейные волны – 2002 / отв. ред. А.В. Гапонов-Грехов, В.И. Некоркин. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2003. С. 90–114.

4. *Нуйдель И.В., Соколов М.Е., Кузнецова Г.Д., Яхно В.Г.* Моделирование динамических процессов преобразования сенсорных сигналов в таламокортикальных сетях // Известия вузов. ПНД. 2011. № 6. С. 117–129.

5. *Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С.* Основы теории сложных систем. М. ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» : Институт компьютерных исследований, 2007. С. 20.

6. *Blumenfeld H., Coulter D.A.* Thalamocortical Anatomy and Physiology // Epilepsy : A Comprehensive Textbook / ed. J. Engel, Jr. and A. Pedley. Piladelphia : Liippincott Raven Publisher, 1997. P. 341.

Вегетативные отображения эмоциональных образов, связанных с прослушиванием коротких музыкальных фрагментов

М.Н. Корсакова-Крейн[1], Н.В. Мигунова*[2], С.А. Полевая*[3]

[1]Touro College, Lander College for Women, New York, USA
mnkors@gmail.com
*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2] ninuska.migunova@mail.ru
[3]s453383@mail.ru

Музыку называют языком эмоций. Исследователи признают, что музыка вызывает эмоции [1]. Искусство музыки не репрезентативно и потому категорически отлично от таких средств общения, как речь, где передача информации происходит при помощи констант сознания [2]. Например, несмотря на разнообразие лингвистических языков, репрезентативная форма речевого общения позволяет высокую степень точности при переводе с одного языка на другой. В музыке нет ни слов, ни частей речи; вместо этого музыка использует чрезвычайно примитивный способ кодирования сложной эмоциональной информации. Этот способ основан на воспринимаемом тональном напряжении, которое связано с мускульными реакциями [3].

Исследователи делят эмоции на две подгруппы: основные (утилитарные) и эстетические [4]. Эмоции объясняются как суперординарные программы, воздействующие на наше сознание и координирующие и организующие наше поведение [5].

Музыкальные эмоции формируются в ответ на различные аспекты музыкальной выразительности, которые включают уровень тональной определенности, лад, темп и ритм, направление мелодического движения, стиль, динамику, регистр, тембр и плотность музыкальной ткани. Исследования эмоций в музыке в основном сфокусированы на главном морфологическом аспекте музыкального мышления – на тональных взаимоотношениях [6] – и включают изучение реакции слушателей на музыкальные лады [7, 8], тональную модуляцию [9–12], и на то, как музыкальные структуры проявляются для сознания в тональных паттернах [13, 14].

Эмпирические исследования показывают, что музыка способна производить изменения основных физиологических параметров [14, 15], вызывать мурашки по коже [16, 17] и активизировать систему биологической награды [18]. Особенно интересно влияние музыки на вариабельность сердечного ритма (ВСР) [19], поскольку эта вариабельность связана с когнитивными функциями [20].

В нашем пилотном исследовании мы измеряли вариабельность ритма сердца в ответ на музыкальные фрагменты различного эмоционального содержания.

Метод

В исследовании приняло участие 8 студентов-добровольцев (6 женщин, средний возраст участников (24 ± 4,09) года). Испытуемым предлагалось прослушать 12 фрагментов из произведений классической и легкой музыки, каждый фрагмент длительностью примерно 3 минуты. Выбор отрывков основывался на музыкальной практике и на концепции «предвзятость к негативности» [21].

Музыкальные фрагменты представляли собой две основные категории: веселые (с преобладанием мажорного лада) и грустные (с преобладанием минорного лада) [8]. В веселые фрагменты входили две подгруппы стимулов: быстрые и медленные (чтобы учесть влияние темпа на восприятие лада [22]), тогда как в грустные фрагменты входили четыре подгруппы стимулов: трагические, меланхоличные, пугающие, тревожные (таблица). Прослушивание сопровождалось регистрацией ритма сердца. Участникам предлагалось отобразить эмоциональное состояние, вызванное музыкой, в баллах по интенсивности (от 1 до 7) по 11 базовым эмоциям: печаль, злоба, отвращение, надменность, страх, тревога, удивление, изумление, радость, удовольствие, облегчение. Каждое измерение следовало оценить по 7-балльной шкале. В работе использовалась информационная технология событийно-связанной телеметрии (ССТ) ритма сердца [23]. На основе спектрального анализа вариабельности ритма сердца (ВРС) строилось вегетативное отображение музыкального фрагмента в пространстве следующих параметров: суммарная мощность спектра ВРС (TP (мс^2)), мощность спектра в диапазоне частот 0,04–0,15 Гц (LF (мс^2)), мощность спектра в диапазоне частот 0,15–0,4 Гц (HF (мс^2)), индекс вегетативного баланса (ИВБ), частотность стресс-эпизодов [23, 24].

Для статистического анализа применялись ANOVA (метод повторных измерений) и корреляционный анализ, критерий Манна – Уитни.

Результаты

Результаты анализа эмоциональных отображений музыкальных фрагментов позволили оценить связь между отдельными средствами музыкальной выразительности и эмоциями: при медленном темпе выраженность печали и злобы была выше, чем при быстром; при прослушивании минорных фрагментов доминировали тревога, радость и облегчение; 7 эмоций (печаль, страх, тревога, радость, удовольствие и облегчение) из 11 при прослушивании классической музыки были сильнее, чем при прослушивании «легкой».

Таблица

Классификация музыкальных отрывков

Отрывок	Лад	Темп	Жанр	Ссылка
Barber	минор	медлен	клас	https://www.youtube.com/watch?v=CcflwUYYoXk 0:17–3:17
Albinoni	минор	медлен	клас	https://www.youtube.com/watch?v=_eLU5W1vc8Y 0:00–2:57
Poulenc	минор	медлен	клас	https://www.youtube.com/watch?v=quemnTLY3fE 10:50–14:03
Armstrong	мажор	медлен	лег	https://www.youtube.com/watch?v=nYWMhzIRzuU 0:00–3:15
Rachmaninoff	минор	медлен	клас	https://www.youtube.com/watch?v=dbbtmskCRUY 1:20–4:30
Mozart, PC	мажор	медлен	клас	https://www.youtube.com/watch?v=fyjcfcjxq-k 0:00–3:06
Corigliano	минор	быстрый	клас	https://www.youtube.com/watch?v=DXuTezsY6WQ 0:00–2:42
“Jukebox”	минор	медлен	лег	https://www.youtube.com/watch?v=aLnZ1NQm2uk 0:00–3:07
Mozart, L	мажор	медлен	клас	https://www.youtube.com/watch?v=Ym8b3bC_Fq4 0:03–3:11
“Dracula”	минор	быстрый	лег	https://www.youtube.com/watch?v=MvMGEh2DAKU 0:00–3:07
Queen	мажор	быстрый	лег	https://www.youtube.com/watch?v=HgzGwKwLmgM 0:04–3:27
Shostakovich	мажор	медлен	клас	https://www.youtube.com/watch?v=W2f1G7qCSm8 6:33–9:33

Примечание: «Mozart, PC» означает Piano Concerto Моцарта, а «Mozart, L» означает Lachrymose Моцарта; «Armstrong» и «Queen» указывают на исполнителей, тогда как «Dracula» означает название характера. «Минор» и «мажор» означают доминирующий лад в данном музыкальном отрывке. Аббревиация: клас – классическая музыка, лег – легкая музыка.

Установлено, что эмоциональные отображения одного и того же музыкального фрагмента различны у разных людей, и что один и тот же музыкальный фрагмент может вызывать и положительные и отрицательные эмоции (рис. 1), что подтвердило результаты предыдущих исследований [14]. Обнаружена избыточность 11-значного описания эмоционального образа. Выявлены сильные положительные связи оценок внутри модуля положительных эмоций (облегчение, удовольствие, радость и изумление) и внутри модуля отрицательных эмоций (злоба, отвращение, надменность, страх, тревога) ($К_{кор} \geq 0{,}87$, $p \leq 0{,}05$). Между этими модулями проявляются сильные отрицательные корреляции ($К_{кор} \leq -0{,}84$, $p \leq 0{,}05$). Эмоции «печаль» и «удивление» образуют отдельные независимые компоненты эмоционального образа. Таким образом, для описания эмоциональных образов данного набора музыкальных произведений достаточно 4-значного кода, включающего оценки удовольствия, тревоги, печали и удивления.

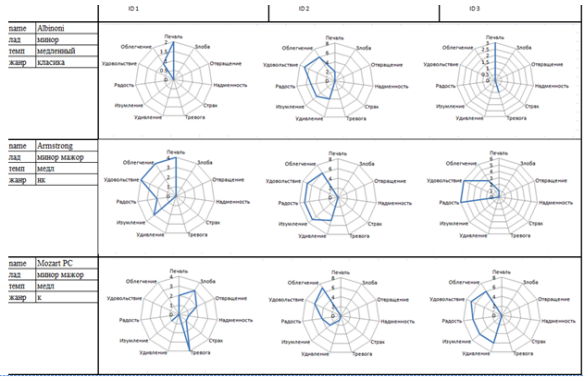


Рис. 1. Разнообразие индивидуальных эмоциональных отображений одного и того же музыкального фрагмента

Благодаря тому, что стимульные музыкальные фрагменты сформировали богатое пространство эмоциональных состояний, удалось исследовать связь между положительными и отрицательными компонентами эмоциональных образов: сила отрицательной компоненты эмоционального образа оказалась связанной логарифмической зависимостью с силой положительной компоненты (рис. 2).

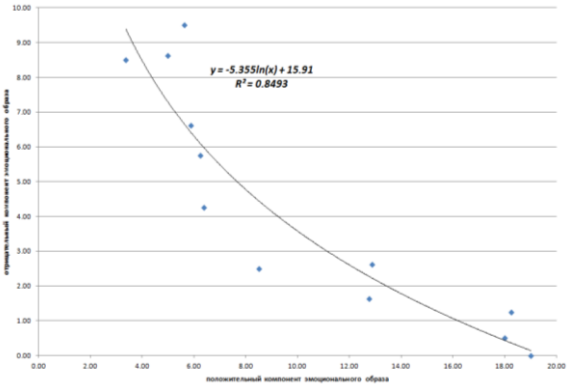


Рис. 2. Связь между отрицательными и положительными компонентами эмоциональных образов

Ранжирование музыкальных фрагментов в соответствии с силой вызываемых ими положительных и отрицательных эмоций дало неожиданный результат: один из фрагментов, Lachrymose Моцарта, оказался ближайшим к точке пересечения кривых положительности и отрицательности эмоциональных образов, связанных с музыкальными фрагментами (рис. 3). Положительные эмоции доминировали при прослушивании фрагментов Poulenc, Barber, Albinoni, Mozart PC, Queen, «Jukebox», Armstrong, а отрицательные эмоции – при прослушивании Corigliano, Rachmaninoff, «Dracula» и Shostakovich. Все четыре фрагмента с доминирующими отрицательными эмоциями написаны в минорном ладу, причем Corigliano («Крысолов») граничит с атональностью, музыкальный образ «Dracula» угрожающ своим жест-

ким ритмом и крещендо на повторяющихся проведениях той же музыкальной темы, а фрагменты из Rachmaninoff («Остров мертвых») и Shostakovich (Симфония № 7, «Ленинградская», финал) наполнены моментами тональной неопределенности и прерывисты по фразировке.

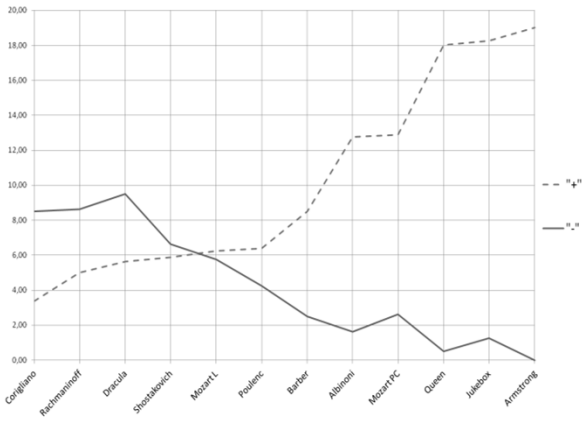


Рис. 3. Рейтинг музыкальных произведений в соответствии с силой положительных и отрицательных компонент эмоционального образа

Для определения вегетативных коррелятов положительных и отрицательных эмоций из всего массива данных были выбраны прецеденты с моновалентными эмоциональными отображениями: положительными (ПЭ: изумление, радость, удовольствие, облегчение) и отрицательными (ОЭ: злоба, отвращение, надменность, страх, тревога). Анализ значимости фактора «валентность» по отношению к динамике ритма сердца показал, что вегетативным отображением валентности эмоционального образа является плотность короткоживущих стресс-эпизодов (Stressindex 1, [25, 26]), которые человек испытал при прослушивании музыкальных фрагментов, причем отрицательные эмоции оказались связаны с большей плотностью стресс-эпизодов. В показателях активности симпатической и парасимпатической нервной системы, а также в общей мощности спектра вариабельности ритма сердца и уровне вегетативного баланса достоверных отличий не выявлено (рис. 4).

А *Б*

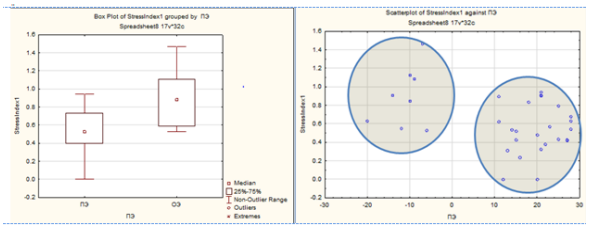


Рис. 4. Вегетативные отображения положительных и отрицательных эмоций: *А* – средние по выборкам значения стресс-индекса (по оси *X* – валентность эмоций в выборке; по оси *Y* – среднее значение стресс-индекса как отношения продолжительности острого стресса при прослушивании к общей продолжительности музыкального фрагмента); *Б* – отображение индивидуальных эмоциональных образов при прослушивании музыкальных фрагментов в пространстве следующих параметров: валентность (ось *X*), стресс-индекс (ось *Y*)

Интересно, что выявлены значимые корреляции между оценками отдельных эмоций и отдельными показателями вегетативной регуляции: усиление злобы положительно связано с ростом адаптационного потенциала; при удивлении снижается вегетативное обеспечение (HF) когнитивного контроля; усиление радости и удовольствия связано с уменьшением RR-интервалов.

Малочисленность участников в нашем эксперименте, к сожалению, не позволила провести полноценный анализ характеристик музыкальных стимулов. Тем не менее даже при такой малой выборке было найдено и показано пространство эмоций. Изучение эмоционального восприятия музыки важно как для ее терапевтических приложений, так и для понимания сложных эмоций, т. е. для понимания человеческого сознания.

Литература

1. *Juslin P.N., Sloboda J.A.* Handbook of music and emotion. N. Y. : Oxford University Press, 2001.
2. *Солнцев В.М.* К вопросу о семантике, или языковом значении (вместо предисловия) // Проблемы семантики. М., 1974.
3. *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.
4. *Scherer K.R., Zentner M.* Music-evoked emotions are different – more often aesthetic than utilitarian // Behavioral and Brain Sciences. 2008. V. 31. P. 595–596.
5. *Cosmides L., Tooby J.* Evolutionary psychology and the emotions // Handbook of Emotions / eds. M. Lewis & J.M. Haviland-Jones. 2nd Edition. N. Y. : Guilford, 2000. P. 91–115.
6. *Lerdahl F., Krumhansl C.L.* Modelling tonal tension // Music Perception. 2007. V. 24, № 4. P. 329–366.
7. *Hevner K.* The affective character of the major and minor modes in music // Am. J. Psychology. 1935. V. 47, № 1. P. 103–118.
8. *Virtala P., Tervaniemi M.* Neurocognition of major-minor and consonance-dissonance // Music Perception : An Interdisciplinary Journal. 2017. V. 34, № 4. P. 387–404.
9. *Koelsch S., Rohrmeier M., Torrecuso R., Jentschke S.* Processing of hierarchical syntactic structure in music // Proceedings of the N.A.S. of the USA. 2013. V. 110. P. 15443–15448.
10. *Korsakova-Kreyn M., Dowling J.W.* Emotional processing in music : Study in affective responses to tonal modulation in controlled harmonic progressions and real music // Psychomusicology. Music Mind and Brain. 2014. V. 24, № 1. P. 4–20.
11. *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. Psychophysiology. 2014. V. 94, № 2. P. 192.
12. *Tillmann B., Bharucha J.J., Bigand E.* Implicit learning of tonality : A self-organizing approach // Psychological Review. 2000. V. 107, № 4. P. 885–913.
13. *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.
14. *Krumhansl C.L.* An exploratory study of musical emotions and psychophysiology // Canadian Journal of Experimental Psychology. 1997. V. 51. P. 336–352.
15. *Bernardi L., Porta C., Sleight L.* Cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory changes induced by differ-

ent types of music in musicians and non-musicians : The importance of silence // Heart. 2006. V. 92. P. 445–452.

16. *Panksepp J., Bernatsky G.* Emotional sounds and the brain : The neuro-affective foundations of musical appreciation // Behavioural Processes. 2002. V. 60. P. 133–155.

17. *Sachs M.E., Ellis R.J., Schlaug G., Loui P.* Brain connectivity reflects human aesthetic responses to music // Social Cognitive and Affective Neuroscience. 2016. V. 11, № 6. P. 884–891.

18. *Blood A.J., Zatorre R.J.* Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated with reward and emotion // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2001. V. 98. P. 11818–11823.

19. *Koelsch S., Jäncke.L.* Music and the heart // European Heart Journal. 2015. V. 36, № 44. P. 3043–3049.

20. *Thayer J.F., Hansen A.L., Saus-Rose E., Johnsen B.H.* Heart rate variability, prefrontal neural function, and cognitive performance: the neurovisceral integration perspective on self-regulation, adaptation, and health // Annals of Behavioral Medicine. 2009. V. 37. P. 141–153.

21. *Ito T.A., Larsen J.T., Smith N.K., Cacioppo J.T.* Negative information weighs more heavily on the brain : The negativity bias in evaluative categorizations // J. Personality and Social Psychology. 1998. V. 75, № 4. P. 887–900.

22. *Webster G.D., Weir C.G.* Emotional responses to music : Interactive effects of mode, texture, and tempo // Motivation and Emotion. 2005. V. 29. P. 19–39.

23. *Полевая С.А., Еремин Е.В., Буланов Н.А., Шишалов И.С., Чернова М.А., Парин С.Б.* Событийно-связанная телеметрия для детектирования имплицитного стресса в контекстах естественной деятельности // Процедуры и методы экспериментально-психологических исследований / отв. ред. В.А. Барабанщиков. М. : Институт психологии РАН, 2016. С. 69–75.

24. *Parin S.B., Polevaia S.A., Gromov K.N., Polevaia A.V., Kovalchuk A.V.* Short-term variability of R-R intervals during acute stress in healthy adults: neuromorphic model, experiment data, monitoring of daily life activity // Int. J. Psychophysiology. 2016. V. 108. P. 88.

25. *Бахчина А.В., Парин С.Б., Полевая С.А.* Динамика когнитивных и вегетативных функций человека в стрессогенных информационных контекстах // Форум молодых ученых : тезисы докладов. Т. 2. Н. Новгород : ННГУ, 2013. С. 167–169.

26. *Parin S.B., Bakhchina A.V., Polevaia S.A.* A neurochemical framework of the theory of stress // Int. J. Psychophysiology. 2014. V. 94, № 2. P. 230–231.

Когнитивная архитектура робота Ф-2, поддерживающего коммуникацию с человеком

А.А. Котов, Н.А. Аринкин, Л.Я. Зайдельман, А.А. Зинина

НИЦ «Курчатовский институт», Москва
kotov_aa@nrcki.ru

Один из подходов к исследованию когнитивных функций человека – это создание компьютерных моделей, воспроизводящих отдельные механизмы эмоций, мышления, логического вывода или поведения. Актуальным приложением такого метода является разработка «человекоподобных» роботов, моделирующих не только функции мышления, но и средства общения с человеком.

Робот Ф-2 разрабатывается как исследовательский проект с целью построить модель когнитивной архитектуры человека, достаточную для поверхностного понимания текста и поддержания коммуникации, включая речевое, жестовое и мимическое общение. Робот получает на вход тексты на русском языке в письменной или акустической форме (для распознавания используется Yandex Speech API) и на выходе демонстрирует речевые высказывания, мимику и жесты, соответствующие реакции на поступивший текст.

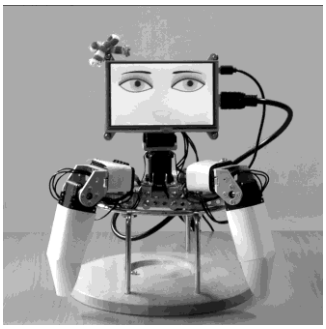


Рис. 1. Робот Ф-2, предназначенный для поддержания речевого, жестового и мимического общения с человеком

В составе робота находятся три основных компонента:

- **лингвистический компонент** выполняет анализ текста и строит его семантическое представление;
- **компонент сценариев** выбирает одну или несколько реакций на построенное семантическое представление;
- **компонент управления** выполняет в роботе речевые, мимические или жестовые паттерны, определенные для конкретной реакции, а также обеспечивает баланс между конкурирующими реакциями.

Хотя возможность компьютерного понимания текста вызывает большие споры в области философии сознания, в частности это дискуссии вокруг «аргумента китайской комнаты» Дж. Сирла [1], мы рассматриваем понимание текста как возможность построить семантическое представление в лингвистическом компоненте, выбрать релевантную реакцию в компоненте сценариев и выполнить ее в роботе с помощью компонента управления.

Лингвистический компонент

В составе компонента последовательно выполняются три этапа лингвистической обработки: морфологический, синтаксический и семантический анализ. Каждый этап является необходимой ступенькой для следующего. В созданной нами системе обработки текстов каждый модуль передает результаты своей работы следующему модулю, а также может сохранить эти результаты в базе данных. Пользователь может выбирать набор модулей в системе в зависимости от конкретной задачи. Рассмотрим каждый из этапов анализа и связанные с ним задачи.

В основе **морфологического модуля** лежит словарь, содержащий более 48 тысяч лексем со всеми словоформами, грамматическими характеристиками и семантическими признаками. Словарь сформирован на основе материалов проекта Open Corpora [2]. Морфологический модуль ищет каждую словоформу текста в словаре и приписывает ей морфологические характеристики. Результатом работы данного этапа является морфологический разбор предложения, который может быть сохранен в виде JSON-структуры. В данной структуре для каждой словоформы предложения указана ее нормальная форма, а также грамматические характеристики (род, число, падеж, время и др.). Кроме того, в структуре отображаются все случаи лексической омонимии – количество наборов грамматических характеристик и начальной формы словоформы-омонима соответствует числу гипотез, порожденных алгоритмом морфологического разбора. Все несловарные лексемы получают в структуре соответствующую помету. Морфологический этап является не только подготовительным шагом для синтаксического анализа, но и самостоятельным процессом, который может использоваться для поиска текстов по ключевым словам, а также для выявления неизвестных системе лексем с целью пополнения словаря.

Синтаксический модуль системы хранит описание грамматики русского языка в виде 490 грамматических правил на специально разработанном языке syntXML [3]. Каждое правило может менять состав признаков одного слова либо устанавливать синтаксическую связь между двумя и более словами. Последовательное применение синтаксических правил позволяет построить для

предложения синтаксическое дерево. В случае омонимии для одного предложения строится два и более деревьев. Кроме того, для части предложений может быть не построено ни одного дерева – такое возможно, если в предложении присутствуют не описанные правилами синтаксические структуры или несловарные лексемы с неизвестной сочетаемостью. Синтаксическое дерево далее может передаваться в семантический компонент для конструирования смысла либо сохраняться в базе данных в формате treeJSON – этот формат фиксирует структуру синтаксического дерева, а также морфологические и синтаксические признаки каждой словоформы.

В задачу **семантического модуля** входит конструирование семантического представления текста, которое далее передается в компонент сценариев и может быть сохранено в базе данных. Семантический модуль работает с набором из 560 семантических признаков: слова получают определения в виде ранжированного множества признаков. Всего с помощью признаков размечены 28600 слов словаря. В качестве семантического представления односоставного предложения используется семантическая предикация: глагол и множество его актантов. В семантической предикации признаки каждого актанта приписаны семантической валентности: *агенс, пациенс, инструмент* и т. д. Такое семантическое представление является достаточным для общей классификации фактов, содержащихся в тексте, – при сохранении фактов в базе данных пользователю становится доступен поиск по структуре ситуации. Так, по запросу ‘ситуация, в которой некто живой что-то ест’ пользователь получит предложения *кошка ест рыбу* и *Вася слопал все котлеты*. Семантические представления также используются роботом для выбора в компоненте сценариев коммуникативной реакции на поступившее сообщение.

Компонент сценариев

Семантическое представление сравнивается с набором сценариев – *продукций* или правил типа *если-то*. Для выбора роботом эмоциональной реакции используется инвентарь *д-сценариев* [4, 5]. Сценарии позволяют роботу рассматривать входящее событие как ситуацию ‘меня никто не любит’ (д-сценарий НЕНУЖН), ‘меня все обманывают’ (ОБМАН), ‘они не соображают, что делают’ (НЕАДЕКВ) или ‘на меня все обращают внимание’ (ВНИМАНИЕ) и т. д. Активизация сценария зависит как от входящего события, так и от «темперамента» или текущего «настроения» робота.

Сценарий связан с шаблонами высказываний, жестами и элементами мимики, описанными в составе поведенческого блока на языке BML – Behavior Markup Language [6]. При активизации сценария связанные с ним блоки BML передаются в компонент управления роботом для исполнения.

Компонент управления роботом

Компонент управления роботом синтезирует поступающие высказывания (используется Yandex Speech API), а также выполняет поступившие инструкции BML с помощью исполнительных элементов робота: рук, головы и элементов лица. Поступившие блоки BML упорядочиваются по снижению активизации породившего их сценария (неотложные реакции перемещаются вперед) и выполняются по мере освобождения исполнительных элементов робота.

Робот получает доступ к библиотеке жестовых и мимических паттернов, сформированной на основе Русского эмоционального корпуса REC [7]. Корпус содержит видеозаписи реального общения людей в эмоциональных ситуациях: на университетских экзаменах, на приеме населения в муниципальной службе, а также во время специально организованных интервью. Разметка корпуса выделяет жесты и элементы мимики, характерные для определенных коммуникативных реакций. Эти элементы зарисовываются с помощью программы Blender и сохраняются в базе данных, доступной роботу при выполнении пакетов BML.

Предлагаемая архитектура является «поверхностной» моделью когнитивных функций человека, которая, тем не менее, позволяет строить семантическое представление высказываний и выбирать поведенческий компонент для реакции робота.

Литература

1. *Сирл Д.* Разум, мозг и программы // Глаз разума / ред. Д. Хофштадтер и Д. Деннет. Самара : Барах-М, 2003. С. 315–331.

2. *Bocharov V.V., Alexeeva S.V., Granovsky D.V., Protopopova E.V., Stepanova M.E., Surikov A.V.* Crowdsourcing morphological annotation // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. Вып. 12 (19), т. 1. М. : РГГУ, 2013. С. 109–114.

3. *Kotov A., Zinina A., Filatov A.* Semantic Parser for Sentiment Analysis and the Emotional Computer Agents // Proceedings of the AINL-ISMW FRUCT 2015. 2015. P. 167–170.

4. *Котов А.А.* Механизмы речевого воздействия в публицистических текстах СМИ : дис. … канд. филол. наук ; 10.02.19 ; защищена 23.06.03. М., 2003.

5. *Котов А.А.* «Машина Оруэлла»: подходы к автоматическому созданию воздействующих текстов // Понимание в коммуникации : человек в информационном пространстве. Ярославль : ЯГПУ, 2012.

6. *Kopp S., Krenn B., Marsella S., Marshall A., Pelachaud C., Pirker H., Thórisson K., Vilhjálmsson H.* Towards a Common Framework for Multimodal Generation: The Behavior Markup Language // Intelligent Virtual Agents. 2006. P. 205–217.

7. *Kotov A., Budyanskaya E.* The Russian Emotional Corpus: Communication in Natural Emotional Situations // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. Вып. 11 (18), т. 1. М. : РГГУ, 2012. С. 296–306.

Актуализация опыта как возможная причина фрактальной структуры поискового поведения

А.К. Крылов

Институт психологии РАН, Москва
neuru@mail.ru

Значение фрактальной структуры поведения

Феномен фрактальной структуры поведения [1–3] бросает вызов рефлекторной теории и может даже рассматриваться как аргумент в пользу наличия свободы выбора [2, 4, 5]. Поэтому структура поведения животных в однородной среде, т. е. в отсутствие внешних стимулов [1, 2, 6], представляет парадигмальный интерес [4, 5, 7, 8].

Проведенный нами анализ теории рефлекса позволил дать следующее определение ее парадигмального ядра: с точки зрения парадигмы реактивности и теории рефлекса «организм в своем действии и состоянии объективно отражает предшествующий внешний сигнал», т. е. рефлекторный агент является преобразователем внешних сигналов, что можно моделировать в виде [9]

$$Действие(t+1) = F(Ситуация(t)). \quad (1)$$

Для рефлекторного агента невозможна зависимость текущего действия от прошлого действия, так как рефлекс признает детерминацию действия исключительно текущим внешним стимулом [9]. Поэтому теория рефлекса не рассматривает эффект последовательности, зависимость текущего действия от прошлого действия испытуемого и эффекты преднастройки, для объяснения которых используется системная психофизиология [10]. Феномен автокорреляций в поведении – когда следующее действие с большей вероятностью совпадает с предыдущим [6], означает наличие внутренних детерминант и не рассматривается в парадигме реактивности. Фрактальная структура поведения в однородной среде также не поддается объяснению в рефлекторной теории [1, 2, 5]. Действительно, если организм в своих реакциях отражает внешний сигнал, как это предполагает теория рефлекса, то реакция не может быть сложнее, чем входной сигнал, а фрактальная структура поведения максимально сложна и не может быть получена простым преобразованием входного однородного сигнала (константы) по уравнению (1) [2, 4, 5]. Например, в поисковом поведении в однородной среде статистика длительностей движения в одном направлении имеет степенной характер [1, 2] (как график на рис. 1 «ДИН»), такой же, как у фракталов, т. е. не является случайным. Рефлекторный агент, совершающий действия (рефлексы) с фиксированными вероятностями, не может генерировать такую статистику поведения (получится, как на рис. 1 «ФИКС», подробнее ниже). Поэтому наличие фрактальной структуры поведения или хотя бы наличие степенной формы распределения длительностей действий (как на рис. 1 «ДИН» и далее на рис. 2–4) доказывает их внутреннюю причинность [2, 4, 5].

Аналогичные фрактальные структуры были обнаружены: на уровне нейронов – в спайковой активности нейронов [4, 11, 12], в ЭЭГ – суммарной активности мозга [13–16], в психологической структуре опыта [17], поведении [3], социальных процессах [18]. Таким образом, этот феномен сложности структуры обнаруживается на разных уровнях организации активности. Строго говоря, для обнаружения именно фрактальной структуры необходимо использовать методы типа анализа фактора Фано и перемешивания последовательности данных [4, 11], но в большинстве работ фокусируют внимание на степенной зависимости в статистике данных, которая легко видна на графиках как прямая в логарифмических координатах (см. рис. 1 «ДИН» и далее рис. 2–4). Как будет показано ниже, уже эта форма кривой не может генерироваться рефлекторным агентом, и поэтому ее моделирование заслуживает внимания.

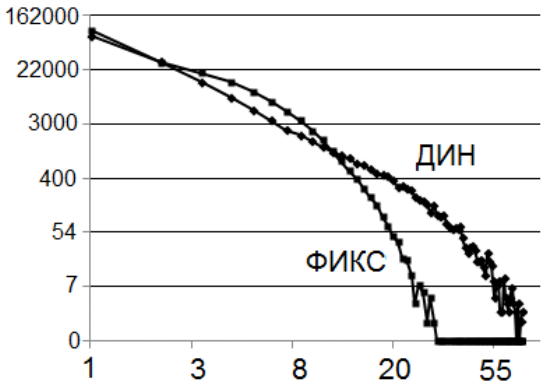


Рис. 1. Статистика длительностей цепочек однотипных действий в модели динамики актуализации опыта («ДИН») и с фиксированной вероятностью совершения действия («ФИКС»). Кривую «ДИН» можно аппроксимировать прямой, что означает степенную зависимость и возможную фрактальность. У «ФИКС» этого свойства нет. По горизонтали – длительность цепочки действий. По вертикали – количество случаев. Оси в логарифмическом масштабе

Системный подход

В настоящей работе проверяется гипотеза о том, что системная структура опыта, в отличие от набора рефлексов, может быть причиной фрактальности структуры поведения. С точки зрения системной психофизиологии, основанной на парадигме активности и системном подходе, поведение организма и активность нейронов не подчиняются принципам рефлекса и парадигмы реактивности, но имеют внутреннюю причину своей целенаправленности и активности [9, 19–22], а опыт формируется

не как набор рефлексов, а как системная структура [22]. При освоении нового навыка в процессе поведенческих проб постепенно формируется и затем фиксируется новый элемент структуры опыта [21]. Элемент опыта фиксирует новый способ взаимодействия индивида с предметной областью. Любому элементу опыта можно сопоставить степень его актуализации в данный момент $A(t)$. Физиологически актуализация элемента опыта реализуется активностью нейронов, образующих этот элемент опыта [20], и степень актуализации отражается в величине спайковой активности этих нейронов в данном акте [23]. Поэтому актуализация элемента опыта является одновременно психологическим и физиологическим явлением, которое может быть зарегистрировано объективным методом – регистрацией активности нейронов [19–23]. Поэтому моделирование в терминах актуализации элементов опыта решает психофизиологическую проблему, а не порождает ее, как при построении моделей в непсихофизиологических терминах. Актуализация элемента опыта $A(t)$ вариативна в последовательных реализациях [10, 23].

Модель формирования элемента опыта

Ранее нами построена модель [24] формирования нового элемента опыта при освоении нового навыка, отражающая статистику кривых научения в эксперименте по обучению животных [25]. Изменение актуализации в простой задаче с одним элементом опыта можно описать экспоненциальным ростом (2) [22. С. 283]. Вероятность совершения данного действия принимаем равной степени актуализации $A(t)$ этого элемента опыта. После совершения правильного действия степень актуализации возрастает:

$$A(t+1) = A(t) + 0{,}15 \cdot (1 - A(t)). \qquad (2)$$

В этом эксперименте правильное действие животного всегда подкреплялось [25], поэтому правильное в данной задаче действие всегда успешно, а вместо неуспехов возможна лишь пауза – когда животное выполняет другие действия. Возможность неуспеха осваиваемого действия отсутствует, поэтому актуализация этого формируемого элемента опыта только растет (2). Когда $A(t)$ достигает порога 0,9, считается, что элемент фиксируется и обучение завершено [24, 26]. Стартовое значение $A(0) = 0{,}05$. Далее оценивалась статистика длительностей обучения в 34 таких экспериментах и сравнивалась с обучением 34 животных. Оказалось, что кривые обучения и их статистика совпадают численно и по форме [24], т. е. эта модель (2) достаточно хорошо описывает динамику обучения навыку в таком классе экспериментов.

Рефлекторная модель

По сравнению с описанным обучением дефинитивному поведению поисковое поведение имеет принципиальное отличие – в процессе поиска все действия, кроме последнего, не приводят к достижению успеха. В стандартных задачах на поисковое поведение в однородной среде, когда агент (или животное) не может знать, совершая очередное действие, приближается ли к цели, «неуспешность» действий при поиске является нормой и все действия, кроме самого последнего, не подкрепляются. Тем не менее в парадигме моделей обучения с подкреплением (reinforcement learning) модель рефлекторного агента (1) [27] успешно обучается поисковому поведению, например поиску пищевых объектов в двумерной среде, обладая очень ограниченными визуальными сенсорами и обучаясь набору рефлексов вида «с вероятностью P_{ij} в ситуации i совершить действие j». При этом поисковое поведение может организовываться даже не одним действием, а несколькими почти равновероятными действиями: в этой модели [27] агент научается в ситуации «нет объектов в поле зрения» совершать поисковое действие «поворот левого колеса» с определенной вероятностью (порядка 0,5) и действие «поворот правого колеса» с противоположной вероятностью. После совершения действия в следующий момент времени опять применяются те же вероятности. Если описать эту рефлекторную модель (1) в терминах актуализации элементов опыта, то здесь вероятность актуализации оказалась бы фиксированной, т. е. не зависящей от актуализации этого элемента в предыдущий момент (чего быть не может с точки зрения системной психофизиологии [10, 19–23]). Такая модель по (1) [27], с фиксированной актуализацией $A(t) = A(0)$ дает статистику длительностей цепочек одинаковых действий не степенной формы (рис. 1, «ФИКС»). Эта статистика не соответствует экспериментальным данным [1, 3].

Модель динамики актуализации

При поиске в однородной среде, «успешно» действие или «неуспешно» с точки зрения животного, можно оценить так: если животное продолжает движение в избранном направлении, то считает это действие успешным; а если меняет направление, то считает неуспешным [1]. С позиций системной психофизиологии происходит либо продолжение актуализации элемента опыта (реализующего рассматриваемое действие) и продолжение этого действия, либо деактуализация и прекращение этого действия. Но поскольку никаких событий во внешней среде не происходит в данной поисковой задаче, продолжается ли актуализация этого элемента опыта, зависит только от самой степени актуализации. Поэтому, аналогично уравнению (2), будем считать, что признание действие успешным в данной пробе и продолжение этого действия пропорционально $A(t)$. Тогда изменение актуализации аналогично (2):

$$A(t+1) = A(t) + k \cdot (0{,}9 - A(t)), \text{ если «успех»}; \qquad (3)$$

$$A(t+1) = A(0), \text{ если «неуспех».}$$

Если же происходит деактуализация текущего активного элемента опыта, иными словами – действие признано неуспешным в данный момент, то в модели величина актуализации сбрасывается к начальному значению $A(0)$. Величина $A(0)$ отражает

количество N альтернативных действий в данной ситуации и может быть равна $1/N$ с тем, чтобы все возможные поисковые действия оказались снова равновероятны. Статистика длительностей цепочек одинаковых действий в этой модели имеет степенной вид (рис. 1, «ДИН»). Эта статистика соответствует экспериментальным данным [1, 3].

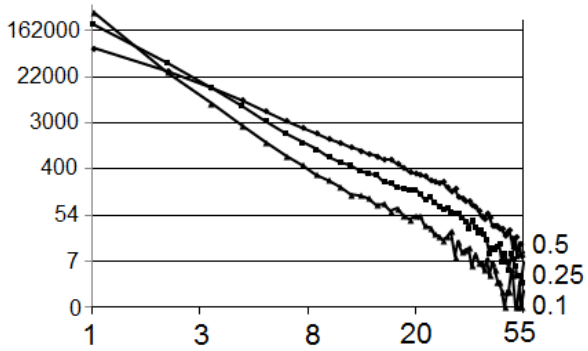


Рис. 2. Зависимость статистик длительностей цепочек действий от начальной актуализации $A(0)$ (показаны справа). Обозначения как на рис. 1. Форма кривых не меняется, может быть аппроксимирована прямой, меняется только наклон прямой (уменьшается с ростом $A(0)$). Это означает, что статистика имеет степенной вид и, возможно, фрактальную структуру.

При варьировании значения величины начальной актуализации $A(0)$ форма кривых сохраняется, меняется только угол наклона (рис. 2). Величина наклона соответствует экспоненте степенной функции и равна 1,9; 2,38; 2,76 соответственно. Для проверки степенной или фрактальной зависимости также используют логарифмический размер бинов [14] – в этом случае форма кривых сохраняется и имеет степенную зависимость (рис. 3). Величина наклона здесь должна получиться на 1,5 меньше чем на рис. 2, и это примерно так: на рис. 3 она равна 0,54; 0,87; 1,12 соответственно.

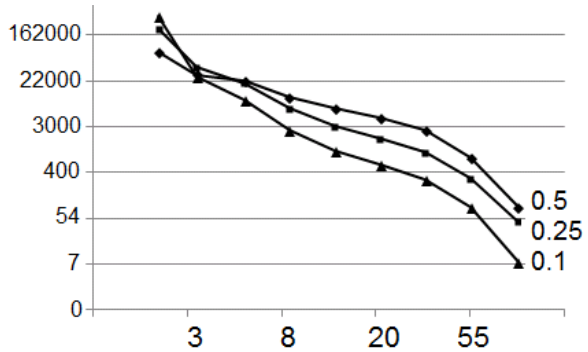


Рис. 3. Те же кривые, что на рис. 2, но в логарифмических бинах (каждая точка здесь суммирует соответствующий интервал на рис. 2). Форма кривых сохранилась – они аппроксимируются прямой линией, т. е. имеют степенной вид и, возможно, фрактальную структуру.

При варьировании скорости изменения актуализации (параметр k) от 0,15 до 0,6 распределение длительностей цепочек действий сохраняет степенную зависимость (рис. 4).

Итак, при варьировании обеих переменных, k и $A(0)$, в модели (3) статистика поведения имеет степенную зависимость длительности цепочек действий, а значит, является свойством модели. Конечно, это еще не означает наличие фрактальной структуры поведения, но дает статистику, аналогичную фрактальной.

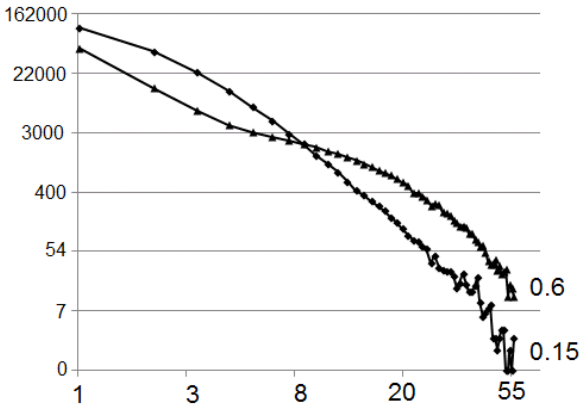


Рис. 4. Статистика длительностей цепочек действий в модели при разных скоростях изменения актуализации k (показаны справа). Обозначения как на рис. 1. Форма кривой сохраняет линейный вид, изменяется наклон.

Обсуждение

Принятие решений – не вероятностный выбор из набора альтернативных рефлексов [27], а процесс актуализации элементов опыта, величина актуализации которых закономерно меняется (или сохраняется) от акта к акту [10, 22, 23]. Длительность цепочки однотипных действий определяется длительностью актуализации этого элемента опыта, и статистика интервалов длительностей действий порождается закономерностями актуализации элементов системной структуры опыта. В настоящей работе показано, что простая модель актуализации дает статистику поведения, имеющую степенную зависимость, аналогичную фрактальной.

Другая модель, математически сходная с нашей, позволила объяснить наличие автокорреляций в поведении [28]. В ней используется динамика «мотивации», сходная с (3). Заметим, что «мотивация» психофизиологически выражается именно актуализацией соответствующего элемента опыта, что физиологически отражается в форме текущей активности нейронов этого элемента опыта, поэтому наша модель представлена в системных психофизиологических терминах.

Если элементами опыта являются «правила поиска», обнаруживаемые в этологии [29], динамика актуализации может объяснить длительные повторные применения правила [29], автокорреляции поведения [6].

Представляется, что наличие автокорреляций в поведении [6] (нарушающих случайность вероятностного принятия решения) показывает, что элементы опыта являются активными (системами) подобно организму (надсистеме), и, находясь в системных отношениях друг с другом, каждый элемент «сам решает» продолжать ли активацию.

Поскольку элемент опыта можно сопоставить с «правилом» в ИИ, это означает, что у животных и человека правило «само решает», когда ему

применяться и продолжать ли применение, при этом находясь в логических отношениях с другими правилами. В мозге нет гомункулуса, который бы решал, какое правило активировать.

Работа выполнена в рамках исследовательской программы Ведущей научной школы РФ «Системная психофизиология» (НШ-9808.2016.6).

Литература

1. *Непомнящих В.А.* Фрактальная структура поведения золотых рыбок Carassius auratus L. (Cyprinidae: Pisces) // Журнал общей биологии. 1998. Т. 59, № 5. С. 513–530.

2. *Maye A., Hsieh Ch., Sugihara G., Brembs B.* Order in Spontaneous Behavior // PLoS ONE, 2007. V. 2(5). Art. e443.

3. *Proekt A., Banavar J.R., Maritan A., Pfaff D.W.* Scale invariance in the dynamics of spontaneous behavior // Proc. Natl Acad. Sci. USA, 2012. V. 109. P. 10564–10569.

4. *Крылов А.К.* Нелинейные и фрактальные свойства нейронной активности – следствия для моделирования // Материалы XV Международной конференции по нейрокибернетике. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2009. Т. 1. С. 105–108.

5. *Непомнящих В.А.* Изменчивость поведения беспозвоночных и проблема свободы воли // Журнал общей биологии. 2012. Т. 73, № 6. С. 435–443.

6. *Непомнящих В.А.* Увеличение изменчивости поведения животных вследствие автокорреляций // Журнал общей биологии. 2012. Т. 73, № 4. С. 243–252.

7. *Крылов А.К.* Фрактальный анализ активности нейронов и поведения модели // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 109–116.

8. *Крылов А.К.* Роль модельного эксперимента и фрактального анализа данных в психологическом исследовании // Экспериментальная психология в России: традиции и перспективы. М. : Институт психологии РАН, 2010. С. 106–110.

9. *Крылов А.К.* Поведение и активность нейронов: целенаправленность или реакция // Когнитивные исследования : Сборник научных трудов. Вып. 5. М. : Институт психологии РАН, 2012. С. 32–43.

10. *Безденежных Б.Н.* Динамика взаимодействия функциональных систем в структуре деятельности. М. : Институт психологии РАН, 2004.

11. *Бибиков Н.Г., Дымов А.Б.* Факторы Фано и Аллана, характеризующие процессы спонтанной импульсной активности слуховых нейронов продолговатого мозга лягушки // Сенсорные системы. 2009. Т. 23, № 3. С. 246–259.

12. *Teich M.C.* [*et al.*] Temporal correlation in cat striate-cortex neural spike trains // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. 1996. V. 15(5). P. 79–87.

13. *Меклер А.А., Горбунов И.А., Болотова С.Ю.* Особенности динамики фрактальной размерности ЭЭГ при протекании эмоциональных процессов, относящихся к различным уровням психической иерархии у больных шизофренией, совершивших социально опасные поступки // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2013 : труды 3-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2013. С. 104–105.

14. *Грубов В.В.* [*и др.*] Перемежаемость в поведении таламокортикальных осцилляторных паттернов на ЭЭГ крыс с предрасположенностью к абсанс-эпилепсии // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2015. С. 68–70.

15. *Вохмина Ю.В.* [*и др.*] Хаотическая динамика параметров электроэнцефалограмм // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 55–57.

16. *Дмитриева Л.А.* [*и др.*] Развитие и применение методов мультифрактального анализа для исследования ЭЭГ в состоянии фона и медитации // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 75–77.

17. *Максимова Н.Е., Александров И.О., Туругбар Д.С.* Топологические свойства семантической сети, представляющей структуру знания: неоднородность и безмасштабность // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 144–146.

18. *Петров В.М., Яблонский А.И.* Математика социального неравенства: гиперболические распределения в изучении социокультурных процессов. М. : Либроком, 2013.

19. *Швырков В.Б.* Введение в объективную психологию : Нейрональные основы психики / под ред. Ю.И. Александрова. М. : Институт психологии РАН, 1995.

20. *Alexandrov Y.I.* [*et al.*] Formation and realization of individual experience in humans and animals: a psychophysiological approach // Complex Brain Functions: Conceptual Advances in Russian Neuroscience. Amsterdam, 2000. P. 181–200.

21. *Александров Ю.И., Горкин А.Г., Созинов А.А., Сварник О.Е., Кузина Е.А., Гаврилов В.В.* Консолидация и реконсолидация памяти: психофизиологический анализ // Вопросы психологии. 2015. № 3. С. 133–144.

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

23. *Александров Ю.И., Шевченко Д.Г., Горкин А.Г., Гринченко Ю.В.* Динамика системной организации поведения в его последовательных реализациях // Психологический журнал. 1999. Т. 20, № 2. С. 82–89.

24. *Крылов А.К.* Моделирование динамики научения при формировании и реорганизации навыка // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 129–131.

25. *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.

26. *Крылов А.К.* Моделирование динамики формирования и актуализации элементов опыта разного уровня дифференциации при научении // Седьмая международная конференция по когнитивной науке : тезисы докладов. М. : Институт психологии РАН, 2016. С. 361–363.

27. *Крылов А.К.* Оценка применимости рефлекторной модели нейронной сети к поведенческой задаче // Труды VI Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2004». Ч. 2. М. : МИФИ, 2004. С. 108–116.

28. *Непомнящих В.А., Редько В.Г.* Метод формирования поискового поведения // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 1. С. 49–54.

29. *Непомнящих В.А., Осипова Е.А., Панкова Н.А.* Спонтанная организация исследовательского поведения рыб // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды 4-й Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 149–151.

Психофизиология слухового анализатора и параметры движений человека

В.И. Майстренко, Е.В. Майстренко, И.Г. Курманов

Сургутский государственный университет

Введение

Звуковое загрязнение окружающей среды оказывает неблагоприятное влияние на умственную и физическую работоспособность человека. Негативные звуковые воздействия могут вызвать нарушение ритма сердечной деятельности, способствуют повышению внутричерепного и кровяного давления и т. д. Первостепенное значение в возникновении у человека неприятных ощущений имеют его отношение к источнику звука, возраст человека, состояние его здоровья. Особенности восприятия человеком звуковой информации исследуются специалистами различных областей знаний, объединяя звук в психологическом понимании и звук, определяемый физически. Акустические воздействия на организм человека исследуются по трем основным направлениям: 1) влияние на орган слуха; 2) воздействие на функции отдельных органов и систем (сердечно-сосудистая, нервно-мышечная, пищеварительная, эндокринная системы, вестибулярный аппарат, обменные процессы, кроветворение и т. д.); 3) воздействие на организм в целом и в частности на высшую нервную деятельность, на вегетативную реактивность. Использование определенных звуковых воздействий может оказывать также и положительное влияние на результат трудовой деятельности, на процесс обучения.

В данной работе на примере реакции нервно-мышечной системы (НМС) человека демонстрируются существенные различия в хаотической динамике микродвижений конечности человека, а именно тремора, у группы испытуемых при акустическом воздействии. В рамках теории хаоса – самоорганизации (ТХС) показаны различия значений площадей S квазиаттракторов (КА) параметров треморограмм (ТМГ) в оценке динамики поведения двигательной реакции правой руки на белый шум и классическую музыку.

Показана практическая возможность применения метода многомерных фазовых пространств для идентификации реальных изменений параметров нервно-мышечной системы человека.

Объект и методы исследования

Идентифицировались параметры квазиаттракторов постурального тремора правой руки испытуемых, которые существенно отличаются для разных возрастных групп. В настоящих исследованиях объектом наблюдения стали 29 студентов (девушек и юношей), обучающихся на 1–3 курсах БУ ВО «Сургутский государственный университет ХМАО – Югры». Обследование студентов производилось неинвазивными методами и соответствовало этическим нормам Хельсинской декларации (2000 г.). Работа выполнялась в рамках плана научных исследований лаборатории «Функциональные системы организма человека на Севере» при Научно-исследовательском институте биофизики и медицинской кибернетики и темы НИОКР «Исследование поведения функциональных систем организма человека на Севере РФ методами многомерных фазовых пространств состояний» (№ 01200965147). Критерии включения: возраст студентов 17–20 лет; отсутствие жалоб на состояние здоровья в период проведения обследований; наличие информированного согласия на участие в исследовании. Критерии исключения: болезнь студента в период обследования [1–4].

Эксперимент включал в себя 3 этапа исследования. На первом этапе у испытуемых регистрировались параметры постурального тремора в виде координаты пальца по отношению к датчику $x_i = x_i(t)$ в спокойном состоянии (при отсутствии активного акустического воздействия). На втором этапе испытуемому было предложено прослушать запись белого шума с одновременной регистрацией параметров нервно-мышечной системы (НМС). На третьем этапе к прослушиванию предлагалась классическая музыка. Между каждым этапом испытуемым предоставлялось время T на восстановление ($T \geq 15$ мин.). Также необходимо отметить, что акустическое воздействие осуществлялось на среднем уровне громкости, при котором испытуемые не испытывали дискомфорта, связанного с высокой интенсивностью звукового потока [3, 4, 9].

Использовались датчики токовихревого типа в биофизическом измерительном комплексе (БИК), разработанном в лаборатории биокибернетики и биофизики сложных систем при СурГУ. Они обеспечивали высокую точность измерений и широкий диапазон частот регистрируемого тремора, а также обработку полученной информации. Принцип работы БИК заключается в использовании сигналов от двух токовихревых датчиков, между которыми помещается исследуемый объект для измерения его микроперемещений. Обработку сигналов с датчиков производили с использованием запатентованной программы (№ 2000610599 от 2000 г.), обеспечивающей получение спектральных характеристик и их анализ в фазовом пространстве состояний [1–4, 6–9].

Расчет параметров квазиаттракторов (КА) производился по программам для ЭВМ, зарегистрированным в Федеральном агентстве по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (свидетельства № 2006613212 и 2010108496).

При этом мы предварительно рассчитывали площади КА регистрируемых треморограмм для всех 29 испытуемых в координатах $x_1 = x_1(t)$ – положение пальца по отношению к датчику, $x_2 = dx_1/dt = x_2(t)$. Расчет площади (в общем случае объема V_G, так как $x_3 = dx_2/dt$) производился на основе общей формулы $V_G^k = \prod_{i=1}^{m} D_i^k$, где D_i^k представляли вариационные размахи по каждой x_i координате.

Статистическая обработка данных осуществлялась при помощи следующих программных пакетов: «Excel MS Office – 2003» и «Statistica-10». Соответствие структуры данных закону нормального распределения оценивалось на основе вычисления критерия Шапиро – Уилка (для выборок $n < 50$). Производилась идентификация параметров тремора на соответствие закону нормального распределения. Закон Гаусса не подтвердился, поэтому дальнейшие исследования зависимостей производились методами непараметрической статистики [1–4, 7–9].

Результаты и их обсуждение

Работа впервые характеризует возможности одновременного использования методов статистики и ТХС. В таблице представлены данные по расчету площадей КА для 3 состояний испытуемых (в спокойном состоянии и при акустических воздействиях). Надежность используемых статистических оценок принималась не менее 95 %. Учитывая, что распределения параметров площадей КА треморограмм отличаются от нормального, все данные представлены в виде медианы и интеквартильного размаха. Интерквартильный размах указывается в виде 5 и 95 процентилей.

Анализ таблицы показал, что средние значения показателей ($X_{ср}$ и 50 Me) для правой руки испытуемых увеличиваются после воздействия белого шума и классической музыки. Это доказывает статистическую неустойчивость ТМГ и может говорить об ответной реакции нервно-мышечной системы испытуемых на акустическое воздействие (рис. 1). Однако полученный результат статистически незначим из-за неопределенности 2-го рода, т. е. стохастика дает низкую эффективность в оценке физиологического статуса испытуемого.

Качественное изменение хаотической динамики можно увидеть на изменении геометрии и конфигурации квазиаттракторов на фазовой плоскости (рис. 2), количественные характеристики КА (средние значения площадей КА) представлены для медиан (табл. и рис. 1).

На рис. 1 представлена динамика Me площадей КА ($S_{KA}\cdot10^{-6}$ у. е.) параметров треморограмм правой руки испытуемых в спокойном состоянии и при различных видах акустических воздействий. Легко видеть, что минимальное значение площади установлено при отсутствии акустических воздействий и составляет $S_{KA} = 0{,}93\cdot10^{-6}$ у. е. При действии белого шума и классической музыки установлено увеличение площади КА до $S_{KA} = 1{,}72\cdot10^{-6}$ у. е. и $S_{KA} = 2{,}04\cdot10^{-6}$ у. е. соответственно [1–5].

Таблица

Результаты статистической обработки данных динамики площадей КА параметров треморограмм ($Z\cdot10^{-6}$ у. е.) в спокойном состоянии и с различными видами акустических воздействий для правой руки испытуемых

N		Без воздействия	Белый шум	Классическая музыка
1		0,53	0,49	0,99
2		0,82	0,81	1,81
3		1,37	1,47	3,23
4		0,90	0,82	1,39
5		3,22	2,9	2,15
6		0,64	1,72	1,77
7		2,09	3,99	5,12
8		3,56	2,8	1,54
9		0,11	0,17	0,29
10		0,65	1,98	0,97
11		0,36	0,39	0,66
12		0,16	0,68	0,79
13		0,50	1,44	4,81
14		0,93	5,04	4,14
15		0,23	1,71	3,66
16		0,97	0,78	1,83
17		0,91	0,53	1,83
18		4,42	2,38	2,04
19		5,37	3,02	0,67
20		0,18	0,04	0,04
21		2,61	27,3	2,59
22		1,94	2,55	2,97
23		1,69	5,26	2,08
24		7,62	6,29	4,36
25		2,95	2,82	6,13
26		1,72	6,05	8,45
27		0,63	0,96	3,68
28		3,67	3,12	2,59
29		0,04	0,05	0,003
$X_{ср}$		1,75	3,02	2,50
Процентили % ср $\times10^{-6}$	**50 Me**	0,93	1,72	2,04
	5, %	0,11	0,04	0,04
	95, %	5,37	6,29	6,14

Примечание: Для описания асимметричных распределений использована медиана (Me), а в качестве мер рассеяния процентили (5-й и 95-й).

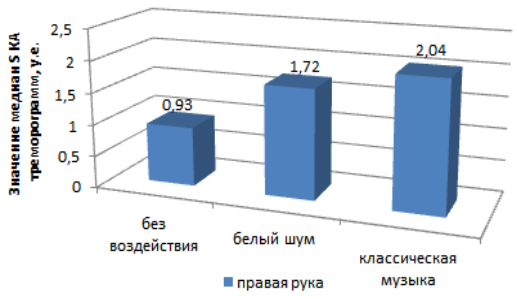


Рис. 1. Динамика значений медиан площадей КА ($Z\cdot10^{-6}$ у. е.) параметров треморограмм в спокойном состоянии и при акустических воздействиях у группы испытуемых

Для наглядной оценки хаотической динамики параметров квазиаттракторов ТМГ были построены фазовые портреты микродвижений в координатах x_i (удаление пальца от датчика) и $x = dx_i/dt$ (скорость перемещения пальца) (рис. 2).

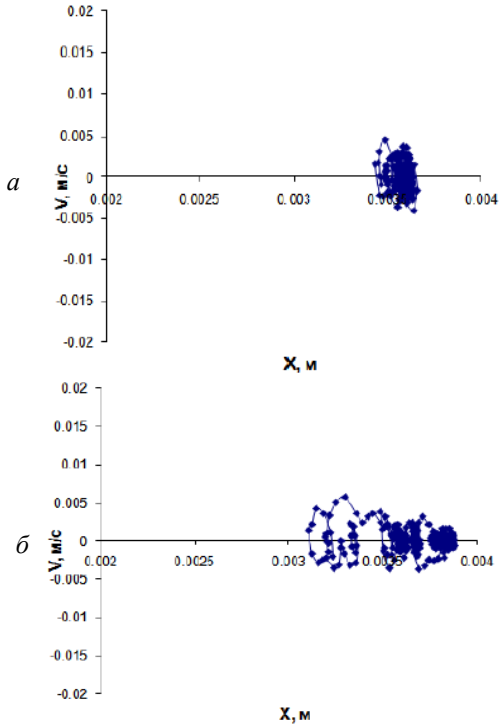


Рис. 2. Фазовый портрет параметров треморограмм испытуемого Ш.М.А. с координатами x_1, $x_2 = dx_1/dt$: *а* – конфигурация КА правой руки испытуемого до звукового воздействия $S_{КА} = 1{,}98 \cdot 10^{-6}$ у. е.; *б* – изменения конфигурации КА правой руки испытуемого после воздействия белого шума $S_{КА} = 7{,}29 \cdot 10^{-6}$ у. е.

Характерный (типичный) пример фазового портрета правой руки испытуемого Ш.М.А. до и после акустического воздействия представлен на рис. 2 (в данном случае размерность фазового пространства была равна двум). Наблюдается резкое увеличение площади КА (почти в 6 раз) после воздействия белого шума (с $S_{КА} = 1{,}98 \cdot 10^{-6}$ у. е. до $S_{КА} = 7{,}29 \cdot 10^{-6}$ у. е.). В большинстве случаев в группе испытуемых значения площадей КА увеличивались после звукового воздействия, что может свидетельствовать об ухудшении самочувствия, увеличении психоэмоционального напряжения, снижении вегетативного тонуса и эффективности деятельности испытуемых [2–5].

Заключение

Анализ моторных реакций с позиций теории хаоса – самоорганизации более выражен, чем с позиций стохастического подхода. Любое направленное акустическое воздействие, изменяя психическое состояние человека, изменяет значения параметров квазиаттракторов НМС, о чем свидетельствуют изменения площадей квазиаттракторов [1–4].

Исследования в этой области показали, что у обучающихся при воздействии белого шума в большинстве случаев не формируется целенаправленная деятельность, устойчивость внимания, падает работоспособность. Сейчас можно говорить об отрицательных изменениях функциональных состояний испытуемых, что понижает уровень готовности к взаимодействию в учебном процессе и снижает качественные характеристики учебной деятельности студентов.

Литература

1. *Еськов В.М., Гудков А.Б., Баженова А.Е., Козупица Г.С.* Характеристика параметров тремора у женщин с различной физической нагрузкой в условиях Севера России // Экология человека. 2017. № 1. С. 38–42.
2. *Зилов В.Г., Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В.* Экспериментальное подтверждение эффекта «Повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2017. № 1. С. 4–9.
3. *Зинченко Ю.П., Хадарцев А.А., Филатова О.Е.* Введение в биофизику гомеостатических систем (complexity) // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 3. С. 6–15.
4. *Филатов М.А., Веракса А.Н., Филатова Д.Ю., Поскина Т.Ю.* Понятие произвольных движений с позиций эффекта Еськова – Зинченко в психофизиологии движений // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 1. С. 24–32.
5. *Филатова О.Е., Зинченко Ю.П., Еськов В.В., Стрельцова Т.В.* Сознательное и бессознательное в организации движений // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 3. С. 23–30.
6. *Хадарцев А.А., Еськов В.М., Филатова О.Е., Хадарцева К.А.* Пять принципов функционирования сложных систем, систем третьего типа // Вестник новых медицинских технологий : [Электронное издание]. 2015. Т. 9, № 1. С. 1–2.
7. *Betelin V.B., Eskov V.M., Galkin V.A., Gavrilenko T.V.* Stochastic Volatility in the Dynamics of Complex Homeostatic Systems // Doklady Mathematics. 2017. V. 95, № 1. P. 92–94.
8. *Eskov V.M., Eskov V.V., Gavrilenko T.V., Vochmina Yu.V.* Formalization of the Effect of “Repetition without Repetition” Discovered by N.A. Bernshtein // Biophysics. 2017. V. 62, № 1. P. 143–150.
9. *Eskov V.M., Bazhenova A.E., Vochmina U.V., Filatov M.A., Ilyashenko L.K.* N.A. Bernstein hypothesis in the Description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // Russian Journal of Biomechanics. 2017. V. 21, № 1. P. 14–23.

Формальное описание семантики решения задач методики «Ход шахматного коня»

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

[1] Институт психологии РАН, Москва
almax2000@inbox.ru
[2] Государственный академический университет гуманитарных наук, Москва
juliazavarnova@mail.ru
[3]Московский НИИ психиатрии
psyastral@mail.ru

Для оценки выполнения тестовых задач используют характеристики качества и времени решения, варианты ошибок, соответствие регламенту теста. На основании этих характеристик возможна формальная количественная реконструкция организации и актуалгенеза психологических структур [1]. Формализация содержательной стороны решения задач остается актуальной и до сих пор нерешенной проблемой.

Решение тестовой задачи можно описать как процесс взаимодействий индивида в рамках институализированной предметной области (ИПО) [3]. В состав ИПО входит собственно предметная область (ПО) и социальная общность (СО). ПО содержит объекты (артефакты), отношения между ними, кодифицированные и имплицитные правила их использования, единые для СО, члены которой являются носителями специфических ценностей, норм поведения и взаимоотношений, ролей и статусов. Для ситуации решения тестовых задач ПО содержит тестовые материалы, инструкции, эксплицитные и имплицитные условия проведения и оценки тестов; СО образуют группа, участвующая в тестировании, и референтные для участников группы лица с соответствующими данной ИПО ролями, статусами, разделяющие ценности и нормы поведения, критические для данной ИПО, например испытуемые и экспериментаторы.

Циклы взаимодействия индивида организованы в соответствии с достижением результатов, предусмотренных или допустимых правилами ИПО. В процессе таких взаимодействий формируется специфическая психологическая структура, образованная двумя типами моделей. Модели *M*1 фиксируют созданные индивидом, использованные и возможные варианты организации взаимодействий с артефактами, избирательно и пристрастно соответствующие организации ПО (артефактам, правилам и т. п., предоставленным ИПО и/или вновь сформированным). Совокупность моделей *M*2 фиксирует сформированные индивидом процедуры манипуляции моделями *M*1, позволяющие достигать предписанных ИПО результатов взаимодействия с ПО.

Модели *M*1 соответствуют организации и условиям предъявления задач; *M*2 – способам решения задач. Соотношение *M*1 и *M*2 определяет содержательную сторону взаимодействий индивида в рамках ИПО, т. е. семантику взаимодействия. Можно предположить, что лишь некоторые варианты *M*1 и *M*2 совместимы; совместимые варианты соотношения *M*1 и *M*2 образуют множество возможных семантик взаимодействия индивида в рамках ИПО. Предполагается, что решая задачи в уме, т. е. оперируя моделями *M*1 и *M*2, испытуемые конструируют формальное семантическое пространство решения задачи.

Цель работы состоит в том, чтобы формально описать варианты семантики (содержательной стороны) решения задач модифицированной методики «Ход шахматного коня» (ХШК), оригинальная форма которой разработана Я.А. Пономаревым [4, 5]. Для построения этого описания использовали логическую реконструкцию возможных вариантов решения задач в соответствии с предъявленными правилами; модификации, расширения и нарушения правил; ошибки, зафиксированные в протоколах решения задач. Предполагается, что характеристика вариантов семантики решения задач составит основу для гипотетического описания психологических структур, формирующихся при вхождении индивида в ИПО «Ход шахматного коня».

Методика

Методика ХШК предназначена Я.А. Пономаревым для оценки способности действовать в уме [4, 5] или, в более общих терминах, оперирования абстракциями [2]. Модификация оригинальной версии методики состоит в том, что испытуемым предъявляется полный набор логически возможных задач.

Испытуемым предлагается переместить фигуру на поле размером 3×3 (строки обозначены цифрами 1, 2, 3, а столбцы – буквами *a*, *b*, *c*, см. рис. 1, *A*) ходом шахматного коня, от указанной в инструкции начальной клетки к конечной кратчайшим путем, называя координаты промежуточных клеток, без визуально предъявленного поля и не используя при решении движения рук. После ознакомления с визуально предъявленным полем и выучивания координат схему поля убирали, и испытуемые без опоры на внешние средства решали 5 серий задач нарастающей сложности (16 задач, требующих для решения 2 хода, 16 задач – 3 хода, 8 задач – 4 хода, 6 задач с запретом использования некоторых клеток поля). После завершения всех серий проводили структурированное интервью. Для последующего анализа вели видеопротокол всего хода решения задач и интервью. В работе

использованы данные, полученные с участием 118 практически здоровых лиц (52 мужчины, 66 женщин, 17–36 лет, медиана = 21 год), а также 20 пациентов с диагнозами F20, F21 и F25 по МКБ-10 (шизофрения) (10 мужчин, 10 женщин, от 20 до 43 лет, медиана = 30 лет).

Результаты

1. Описание правил решения задач

Инструкция (вербальная и визуальная) эксплицирует условия, необходимые для решения задачи: поле из 9 клеток (3×3), буквы и цифры как обозначения строк и столбцов, заштрихованная центральная клетка с запретом ее использования и называния (рис. 1, *А*). Траектория перемещения на поле вводится как «ход шахматного коня» – «буква Г». Собственно задача формулируется как начальная и конечная клетки перемещения фигуры (хода коня «буквой Г»). Специально вводится требование решить задачу кратчайшим путем.

Имплицитными (хотя потенциально открытыми при визуальном предъявлении) остаются следующие составляющие инструкции: 1) «буква Г» имеет ориентацию (от начальной клетки к конечной); 2) «буква Г» – обозначение группы симметрии, содержащей 4 элемента (учитывая ориентацию (рис. 1, *Б*, ср. 1, 2 и 3, 4) и зеркальные отражения (рис. 1, *Б*, ср. 1, 3 и 2, 4), но не ортогональные вращения и параллельные переносы); 3) предлагаемое инструкцией «перепрыгивание» с начальной клетки на конечную описывается не буквой Г, а диагональю прямоугольника 3×2, группой симметрии из 2 элементов, без учета ортогональных вращений и параллельных переносов (такое представление хода коня обозначено Пономаревым как «перекладина» [4]) – см. рис. 1, *В*.

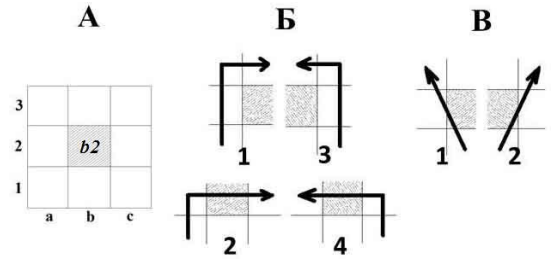


Рис. 1. *А* – схема игрового поля; заштрихованная клетка *b*2 строго исключается из решения задач. *Б* – симметрии переноса фигуры «Буква Г» (в терминах Я.А. Пономарева – «шаблоны»): 1, 2 и 3, 4 – различные ориентации переноса; 1, 3 и 2, 4 – зеркальные отражения. *В* – симметрии переноса фигуры по диагонали прямоугольника 3×2 (в терминах Я.А. Пономарева – «перекладина»). Ортогональные вращения и параллельные переносы на *Б* и *В* не показаны.

Инструкция имплицитно вводит такие составляющие поля, как «углы», «верх», «низ», «право», «лево» и «центр» («запретная» клетка), прямо не указывает на кольцо, которое образуют эффективные клетки поля, на существование альтернативных направлений перемещения по полю (причем траектории перемещения по разным направлениям имеют различную длину для некоторых задач). В инструкции также содержится важное имплицитное условие решения задач – преодоление несоизмеримости геометрии «хода коня» и замкнутого кольца периферии поля, которым визуально ограничены перемещения.

Заметим, что условия, эксплицированные в инструкции, непротиворечивы, внутренне согласованы, но недостаточны для успешного решения задач. Перечисленные имплицитные условия содержат несколько групп положений, которые затруднительно (или невозможно) совместить при конкретном решении задач. Решение задач представляется невозможным без учета любой из этих групп условий (с рефлексией или без рефлексии).

2. Варианты семантики решения задач

Неоднозначность правил представления и решения задачи, большое количество степеней свободы в применении правил, необходимость абстрагирования положений правил, наиболее важных с позиции испытуемого, позволяют предположить, что способ решения задачи и избирательное использование свойств поля являются результатом манипуляции этими абстракциями и основой, определяющей семантику (содержательную сторону) решения.

На исследованной выборке выделено 5 вариантов семантики решения задач.

Семантика-5 – наиболее дифференцированное формальное пространство задачи. Оно конструируется испытуемым в актах перемещения фигуры, которые описываются в терминах начальной и целевой координат поля. Это пространство, описанное в терминах теории графов, образуют два замкнутых маршрута перемещений с разным порядком восьми клеток поля: R_1 – *a*1, *c*2, *a*3, *b*1, *c*3, *a*2, *c*1, *b*3, *a*1 и R_2 – *a*1, *b*3, *c*1, *a*2, *c*3, *b*1, *a*3, *c*2, *a*1. Эти маршруты содержат универсальное решение всех задач методики: они соответствуют порядку координат (вершинам) либо левого, либо правого «полукольца» маршрутов R_1 и R_2 относительно начальной координаты задачи.

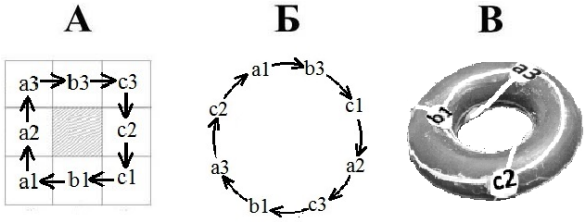


Рис. 2. *А* – маршрут обхода периферии поля. *Б* – маршрут универсального решений задач. *В* – тороическое зацепление *узла* (3, 1), представляющего маршрут обхода периферии поля (см. *А*), который трижды обвивает тор в меридиональном направлении и 1 раз – в экваториальном, и *узла* (1, 3), представляющего маршрут универсальных решений (см. *Б*), который один раз обвивает тор в меридиональном направлении и 3 раза – в экваториальном. На *А*, *Б* и *В* показаны маршруты только одного из двух направлений.

В такой конструкции пространства задачи возможно преодоление несоизмеримости хода коня и

«квадратного кольца» периферии поля (рис. 1, *Б* и 2, *А*). Для установления соизмеримости необходимо связать маршрут обхода периферии поля (*a*1, *a*2, *a*3, *b*3, *c*3, *c*2, *c*1, *b*1; см. рис. 2, *А*) и маршруты универсальных решений (R_1 и R_2; см. рис. 2, *Б*) пересечениями по всем вершинам этих графов без образования дополнительных пересечений дуг: такие пересечения ввели бы в суммарный граф несуществующие вершины. Для упрощения задачи заменим два ориентированных графа R_1 и R_2 одним неориентированным R_{12}.

Анализ матрицы смежности графа R_{12} показал, что он содержит подграф, гомеоморфный графу Куратовского $K_{3,3}$. Следовательно, согласно теореме Понтрягина – Куратовского [6. С. 133], граф R_{12} непланарен, содержит ручку и может быть уложен без самопересечений на поверхности тора (см. рис. 2).

Торическое пространство решения задачи конструируется испытуемым в терминах координат (не клеток!) поля, что устраняет необходимость установления соответствия условий задачи (в значениях координат) и решения через конструкты «столбцы», «строки», «верх», «низ», «углы», «повороты буквы Г» и т. п. Это уменьшает время решения задач, устраняет необходимость повторения условий задачи «в плане громкой речи», переспрашивание условий, называние запретной центральной клетки *b*2 (см. рис. 1, *А*). Конструкция семантики решения задачи в торическом пространстве полностью устраняет ошибки выбора кратчайшего маршрута к целевой клетке, поскольку открывает возможность симультанной оценки альтернативных маршрутов. Глубина прогноза (длина стратегий решения) в этой семантике не ограничена.

Семантика-4 – соотношение способа решения, использования свойств поля и правил, которое основано на *использовании группы симметрии «перекладины»* (см. рис. 1, *В*). Два варианта *акта-перекладины* (не заданные инструкцией), сформированные в процессе решения задач, замещают 4 варианта группы симметрии шаблона «буквы Г» (рис. 1, *Б*). Способы решения задачи в этой семантике ограничены структурой кольцевой периферии поля (рис. 2, *А*). Решение конструируется в терминах *геометрии поля*: строк, столбцов, углов поля, но не в понятиях «верха», «низа», «правой» или «левой» стороны, «центра» поля. Несоизмеримость «квадратного кольца» периферии поля (рис. 2, *А*) и единичного перемещения перекладины потенциально разрешается в представлении о циклическом характере задач, о возможном возвращении в исходную позицию через некоторое фиксированное число шагов перекладины. Установление соответствия условий задачи (значений координат) и решения упрощено конструкцией множества эффективных клеток как цикла перемещений, выбора промежуточных координат решения задачи по их достижимости перекладиной, отсутствием необходимости в центральной клетке *b*2 как ориентире. Запретная центральная клетка *b*2 (см. рис. 1, *А*) и отдельные клетки поля, как составляющие хода, не включается в решение задач: перекладина, в отличие от шаблона, не «состоит» из клеток (ср. рис. 1, *А* и *Б*). Возможны ошибки выбора кратчайшего маршрута к целевой клетке, поскольку глубина прогноза (длина стратегий решения) в этой семантике, по-видимому, составляет не более трех ходов. Испытуемые, конструирующие семантику-4, применяют ее как универсальный способ решения задач разного уровня сложности.

Семантика-3 конструируется на основе группы симметрии актов-шаблонов «буквы Г» (рис. 1, *Б*). Решения задачи строится как ориентация на *карте поля* – в терминах «верх», «низ», «право», «лево» и «центр», соотношение начальной и конечной клеток поля определяется как «рядом», «совсем рядом», «через 1 клетку», «через 2», «напротив». Судя по частому упоминанию клетки *b*2, центр поля занимает важное место в решении задачи. Способ решения задач требует выбора необходимого шаблона из 4 альтернатив (см. рис. 1, *А*), его поворотов (2 альтернативы) и параллельных переносов (2 альтернативы). Большое количество альтернатив, требующих селекции при выборе акта-шаблона, по-видимому, служит препятствием для преодоления несоизмеримости характеристик поля и сконструированного способа решения. Судя по большому количеству повторений и переспрашиваний условий задачи, перепутывания координат, в семантике-3 испытуемые не достигают достаточно точного соответствия условий предъявленной задачи и возможных способов решений. Максимальная длина стратегии в семантике-3 не превышает двух ходов: задачи в 4 и даже в 3 хода решаются в этой семантике «с двух концов»: два хода от начальной координаты в предполагаемую сторону к конечной и два хода от конечной координаты в сторону начальной. Если маршруты встречаются, то направление выбрано правильно. Решения задач в этой семантике не универсальны: испытуемые конструируют для каждого типа задач особый способ решения. Возможно, что особенности этих способов связаны с количеством альтернативных перемещений шаблонов и глубиной прогноза (длиной стратегий).

Семантика-2 конструируется испытуемыми как соотношение способа решения, использования свойств поля и правил, которое может быть охарактеризовано как «построение буквы Г из последовательности клеток». В этой семантике перемещения фигуры коня определяются относительно клеток поля, строк, столбцов, углов поля, направления перемещения определяются как «вверх», «вниз», «направо», «налево», «вперед», «в сторону»; важнейшая роль в ориентации придается клетке *b*2, представляющей «центр» (она может упоминаться в решении одной задачи несколько раз). Соотношение начальной и целевой клеток задачи обозначается как «рядом», «совсем рядом», «через 1 клетку», «через 2», «напротив», «по диагонали». Решения задач в семантике-2, также как в семантике-3, можно обозначить как ориентацию на карте поля, но в семантике-2 «буква Г» представляет собой не единую конструкцию шаблона, как в семантике-3, а последовательность отдельных клеток.

Испытуемые описывают ход коня как совокупность актов смещения на одну клетку, например: «две клетки вперед и одна влево»; совокупность таких актов – типичная стратегия семантики-2. Решение задачи реализуется как ориентация «поклеточного» перемещения на поле, состоящем из несвязанных клеток. Испытуемые повторяют условия задачи несколько раз, переспрашивают их, склонны к потере координат и утрате задачи, часто встречается указание на запретную клетку *b*2. Общее правило решения задач не создается: даже в пределах одной серии решения последовательных задач строятся каждый раз заново.

Для семантики-1 характерна невозможность сформировать устойчивое соответствие условий предъявленной задачи и возможных способов решений в сконструированном пространстве. Можно предположить, что аморфность организации семантики-1 связана с затруднениями в абстрагировании даже эксплицитных положений правил. Возможно, что формирование семантики-1 обусловлено особенностями всех структурных составляющих, обеспечивающих успешность решения задач, поскольку проявления организации семантики-1 весьма обширны. Это затруднения или даже невозможность удерживать условия задачи без опоры на чертеж поля, в серии двухходовых задач необходимость неоднократных повторений начальной и конечной координат, перепутывания координат, утраты задачи, повторяющиеся даже при повторных попытках решения одной и той же задачи, включение клетки *b*2 в решение. Для семантики-1 характерен отказ от продолжения тестирования в серии трехходовых или даже двухходовых задач. Стратегии решения задач без подсказок и помощи экспериментатора, использования чертежей поля не формируются.

Обсуждение результатов

Пять вариантов семантики (содержательного соотношения условий предъявленной задачи и возможных способов решений в сконструированном пространстве задачи) хотя и представляют лишь предварительные результаты анализа данных, находятся в точном соответствии с выделенными Я.А. Пономаревым пятью этапами развития внутреннего плана действий [4, 5].

Содержание моделей *M*1 (фиксирующих организацию и условия предъявления задач ХШК) и *M*2 (фиксирующих способы решения задач), может быть определено и формально описано в соответствии со свойствами 5 вариантов семантики. Именно соотношения характеристик моделей *M*1 и *M*2 ответственны за специфику различных вариантов семантики решения стратегических задач ХШК. Заметим, что вопрос об основаниях достижения согласованности *M*1 и *M*2 остается открытым.

Установлено, что для всего набора задач методики ХШК существует универсальное решение. Оно учитывает как эксплицитные, так и имплицитные правила методики, разрешает проблему соизмеримости характеристик поля и способа решения задач, обеспечивает точное соответствие условий предъявленной задачи и возможных способов ее решения в сконструированном пространстве задачи, максимальную длину стратегий. Такое решение возможно в семантике-5, конструирующей топическое пространство задачи, наиболее дифференцированное и точно соответствующее стратегическому характеру задач.

Предложенное описание вариантов семантик позволяет сформулировать гипотезы для эмпирического исследования:

1) Существуют ли промежуточные варианты семантик?

2) Возможно ли усовершенствование компетенции решения задач ХШК в каждом из вариантов семантики?

3) Возможен ли переход из более простой в более дифференцированную семантику?

4) Являются ли выделенные варианты семантики последовательными этапами формирования компетенции у взрослых испытуемых, или они – специфические, несводимые друг к другу версии организации психологических структур?

5) Существует ли содержательная специфика семантик, формирующихся в методике ХШК, у практически здоровых испытуемых и пациентов с расстройствами спектра «шизофрения»?

6) Различаются ли распределения пяти вариантов семантики в выборках практически здоровых испытуемых и пациентов с расстройствами спектра «шизофрения»?

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 14–28–00229).

Литература

1. *Александров И.О.* Формирование структуры индивидуального знания. М. : Институт психологии РАН, 2006. 560 с.

2. *Александров И.О., Максимова Н.Е.* К обоснованию конструкта «оперирование абстракциями» // Шестая Международная конференция по когнитивной науке, Калининград, 23–27 июня 2014 г. Калининград, 2014. С. 115–117.

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

4. *Пономарев Я.А.* Знания, мышление и умственное развитие. М. : Просвещение, 1967. 264 с.

5. *Пономарев Я.А.* Перспективы психологии творчества // Психология творчества : школа Я.А. Пономарева / под ред. Д.В. Ушакова. М. : Институт психологии РАН, 2006. С. 145–276.

6. *Харари Ф.* Теория графов. М. : Мир, 1973. 296 с.

Выявление характерных периодов при вычислении сложности Лемпеля – Зива сигнала ЭЭГ с переменным окном

А.А. Меклер[1], С.В. Борисенок[2]

[1] Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
mekler@yandex.ru
[2] School of Engineering, Abdullah Gül University, Kayseri, Turkey
borisenok@gmail.com

Одним из методов исследования головного мозга как нелинейной динамической системы является описание информационных характеристик наблюдаемой мозговой активности. Как правило, с этой целью используются величины, характеризующие информационные характеристики регистрируемых сигналов суммарной электрической активности головного мозга – электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Из таких характеристик чаще всего используют энтропию [1] и сложность Лемпеля – Зива (Lempel-Ziv Complexity, LZC) [2]. В литературе имеются данные о связи этих характеристик с различными функциональными состояниями организма [3–8], а также с патологическими процессами и состояниями [9–11]. В нашем исследовании получены новые сведения, касающиеся отражения в LZC особенностей динамики функционирования головного мозга.

В работе использовались записи ЭЭГ, полученные в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми и открытыми глазами. Регистрация осуществлялась с частотой дискретизации 500 Гц. Для дальнейшей обработки были вырезаны видимые артефакты, применены ВЧ- и НЧ-фильтры (0,1 и 70 Гц), а также фильтр-пробка 50 Гц. Осуществлялась многоканальная запись с 19 отведений, расположенных по системе 10–20. Однако, поскольку представляемое исследование не подразумевает выявления связи изучаемых характеристик ЭЭГ с отведением регистрации, для исследований были использованы записи ЭЭГ с отведения Cz.

Для изучения динамики мозговых информационных процессов мы вычисляли сложность Лемпеля – Зива сигнала ЭЭГ, применяя окно переменной величины. Фиксировалось начало окна, после чего оно расширялось. Начальная ширина окна составляла 10 отсчетов (0,02 секунды), конечная – 3000 отсчетов (6 секунд). В итоге получался график зависимости величины LZC от ширины окна.

Поскольку LZC вычисляется для бинарных рядов, на первом этапе сигнал ЭЭГ был преобразован в бинарный. Преобразование осуществлялось по признаку возрастания / убывания в каждой точке (возрастает – «1», убывает – «0»). Далее вычислялась величина LZC согласно рекомендациям, приведенным в [12].

Общая идея вычислений заключается в том, что исходная последовательность нулей и единиц разбивается на структурные единицы («слова») таким образом, что длина этих «слов» минимальна и они не повторяются. Например, последовательность 001110010100011 будет представлена в виде следующего набора «слов»: 0 01 11 00 10 100 011. Таким образом, в данном примере последовательность может быть разбита на семь «слов». Сложность Лемпеля – Зива определяется формулой $\mathrm{LZC} = \frac{C}{n/\log_2 n}$, где C – количество «слов», полученное после описанного преобразования, а n – длина исходного ряда.

По указанной формуле для каждой ширины окна w в интервале от 10 до 3000 отсчетов (0,02–6 с) вычислялась величина LZC, и в результате была получена зависимость LZC(w) – рис. 1 (здесь и далее приведены типичные графики).

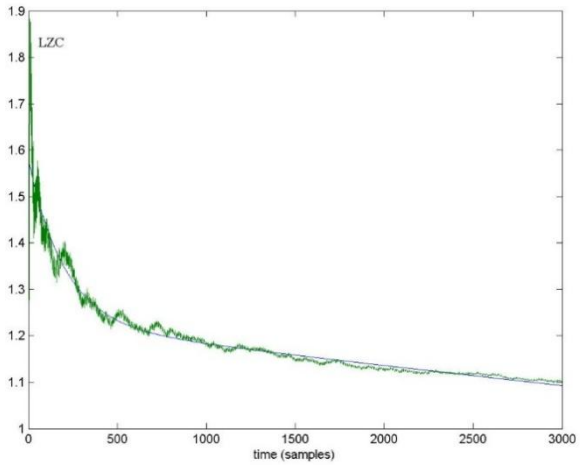


Рис. 1. Зависимость LZC от ширины окна и выделенный экспоненциальный тренд

На рисунке видно, что полученная зависимость имеет тренд, который хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией, и квазипериодическую составляющую. Для выделения последней мы вычли тренд и получили временной ряд, показанный на рис. 2.

Далее для изучения обнаруженной квазипериодики был исследован спектр мощности детрендированного временного ряда. Для этого, согласно теореме Винера – Хинчина, была сначала получена автокорреляционная функция, а затем относительно нее сделано преобразование Фурье. Графики представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

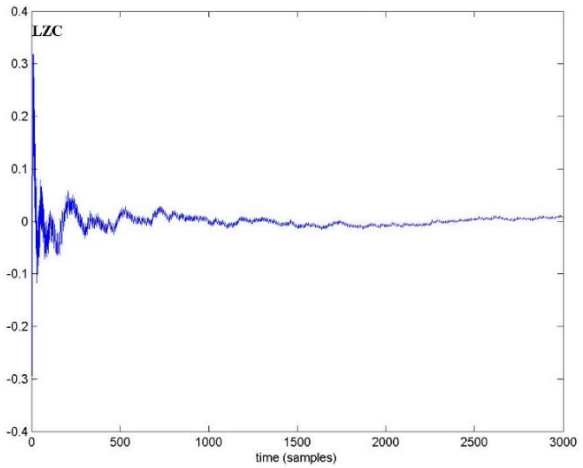


Рис. 2. Зависимость LZC от ширины окна *w* после снятия тренда. Отчетливо видны квазипериодические колебания

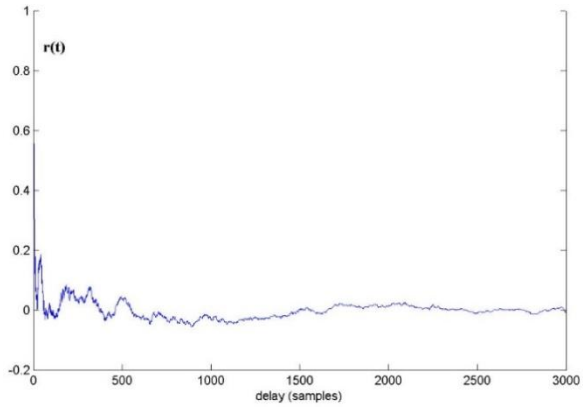


Рис. 3. Автокорреляционная функция детрендированной зависимости LZC от *w*

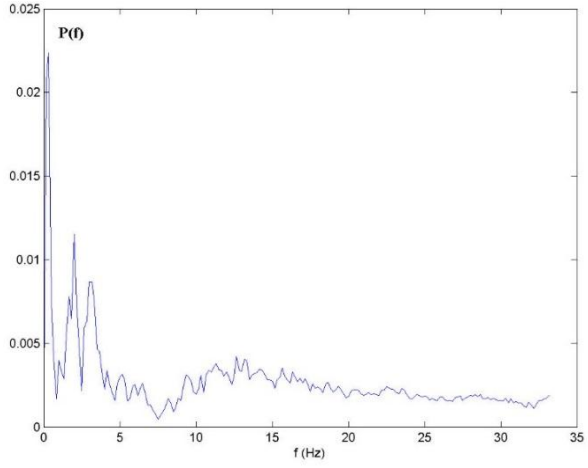


Рис. 4. Спектр мощности детрендированной зависимости LZC от *w*

На рисунках видно, что при увеличении окна *w* происходят изменения LZC. При этом в полученной зависимости присутствует периодическая составляющая. Спектральный анализ показывает, что видимая на графиках периодика соответствует пикам на частотах 0,33; 2 и 3,17 Гц. Наличие такого рода колебаний наблюдается на всех исследованных нами ЭЭГ – как с открытыми, так и с закрытыми глазами (в общей сложности были исследованы ЭЭГ 10 человек).

Самый низкочастотный пик, по-видимому, соответствует длительности изучаемого сигнала (3000 отсчетов = 6 секунд; 0,1667 Гц). А вот более высокочастотные пики обусловлены природой сигнала. С нашей точки зрения, обнаруженное нами явление свидетельствует о периодической смене «словаря» ЭЭГ.

На данный момент не выявлено характерных качественных различий между режимами регистрации ЭЭГ (открытые и закрытые глаза) для всех испытуемых. В перспективе предполагается получение количественных характеристик, описывающих обнаруженную периодическую смену «словаря» ЭЭГ, и поиск статистических различий между функциональными состояниями.

Литература

1. *Shannon C. E.* A mathematical theory of communication // The Bell System Technical Journal. 1948. V. 27, № 3. P. 379–423.

2. *Lempel A., Ziv J.* On the complexity of finite sequences // IEEE Trans. Inf. Theory. 1976. V. 22 (1). P. 75–81.

3. *Bruhn J., Ropcke H.* [*et al.*] Approximate entropy as an electroencephalographic measure of anesthetic drug effect during desflurane anesthesia //Anesthesiology. 2000. V. 92 (3). P. 715–726.

4. *Tononi G., Edelman G.M.* Consciousness and complexity // Science. 1998. V. 282. P. 1846–1851.

5. *Немирко А.П., Манило Л.А., Калиниченко А.Н., Волкова С.С.* Энтропийные методы оценки уровня анестезии по ЭЭГ-сигналу // Информационно-управляющие системы. 2010. № 3. С. 69–74.

6. *Natarajan K., Acharya U.R., Alias F.* [*et al.*] Nonlinear analysis of EEG signals at different mental states // BioMed. Eng. OnLine. 2004. V. 3, iss. 7. doi:10.1186/1475-925X-3-7.

7. *Xu J., Liu Z., Liu R., Yang Q.F.* Information transformation in human cerebral cortex // Physica D. 1997. V. 106. P. 363–374.

8. *Wu X., Xu J.* Complexity and brain function // Acta Biophysica Sinica. 1991. V. 7. P. 103–106.

9. *Quiroga R.Q., Arnhold J.* [*et al.*] Kulback-Leibler and renormalized entropies: applications to electroencephalograms of epilepsy patients // Phys. Rev. E. Stat. Phys. Plasmas Fluids Relat. Interdiscip. Topics. 2000. V. 62 (6. Pt B). P. 8380–8386.

10. *Radhakrishnan N., Gangadhar B.* Estimating regularity in epileptic seizure time-series data // IEEE Eng. Med. Biol. Mag. 1998. V. 17, № 3. P. 89–94.

11. *Abasolo D., Hornero R., Gymez C., Garcна M., Lypez M.* Analysis of EEG background activity in Alzheimer's disease patients with Lempel-Ziv complexity and central tendency measure // Med. Eng. Phys. 2006. V. 28, № 4. P. 315–322.

12. *Hu J., Gao J., Principe J.C.* Analysis of Biomedical Signals by the Lempel-Ziv Complexity: the Effect of Finite Data Size // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2006. V. 53, № 12. P. 2606–2609.

Система обнаружения и распознавания объектов в видеопотоке

В.Р. Милов, А.В. Дмитриев, В.Е. Гай

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель предлагаемой системы – решение задачи обнаружения, сопровождения и распознавания объектов различной природы. Предлагается два режима работы системы: режим распознавания и режим обучения, а также технологический режим отладки. Планируется, что предлагаемая система должна обладать возможностью обучения (добавления новых классов объектов) в процессе функционирования. Структура предлагаемой системы распознавания и обнаружения показана на рис 1.

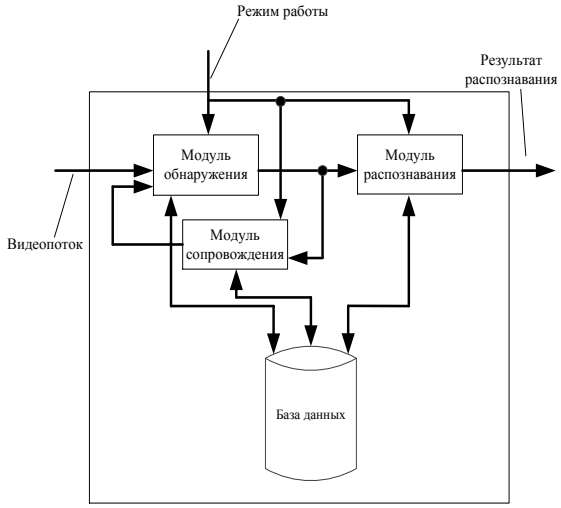


Рис. 1. Информационная модель системы обнаружения и распознавания

Модуль обнаружения предназначен для обнаружения позиции искомых объектов в кадре видеопотока. Обнаружение выполняется на основе сформированного признакового описания объекта, а результат работы модуля представляет собой список обнаруженных объектов и их координаты в кадре. Учитывая необходимость снижения вычислительной нагрузки, модуль обнаружения должен выполнять обработку кадра не целиком, а только некоторых областей кадра, например с целью подтверждения полученных ранее результатов детектирования. Дополнительное снижение вычислительной сложности возможно за счет обработки каждого M-го кадра из N кадров в секунду.

При решении задачи обнаружения для повышения точности и компенсации ложных срабатываний используется схема M из N, т. е. для достоверного обнаружения объекта данный объект должен появиться на M кадрах из N обработанных. При установлении соответствия между парой объектов на i-м и j-м кадрах предлагается оценивать степень пересечения окаймляющих их прямоугольников. Для оценки данной величины можно использовать различные коэффициенты сходства. Основное требование, которое предъявляется к такому коэффициенту, – возможность штрафа за слишком большой размер детектируемой области. Этому требованию удовлетворяют коэффициенты Жаккара и Серенсена и не удовлетворяет коэффициент Шимкевича – Симпсона, а также коэффициент, который подсчитывает общее число точек от пересечения двух областей.

В зависимости от режима работы системы алгоритм работы модуля обнаружения меняется. В режиме распознавания и отладочном режиме на вход модуля подается кадр видеопотока или области кадра, в которых выполняется детектирование, на выходе модуля – результаты поиска объектов. В режиме обучения на вход модуля подается изображение эталона объекта и его класс. Указанные данные используются для обучения модели обнаружения объектов определенного класса.

Решение задачи обнаружения может быть выполнено различными методами, например с помощью детекторов особых точек SIFT (SURF), каскада Хаара, гистограммы ориентированных градиентов и метода опорных векторов [1]. Необходимо отметить, что при использовании SIFT (SURF) и подобных им детекторов особых точек необходимо разработать схему принятия решения. Данная схема должна позволять детектировать множество экземпляров объекта.

Модуль сопровождения предназначен для установления соответствия между экземплярами объектов на N-м и $(N + 1)$-м кадре. Входной информацией для данного модуля является список координат объектов, выданных модулем обнаружения по N-му кадру. Для решения задачи сопровождения могут использоваться различные методы, например Median Flow, TLD, CLT и т. д. [2]

Модуль распознавания предназначен для определения типа обнаруженного объекта по его признаковому описанию в заданной области кадра видеопотока. Результат работы модуля – список распознанных объектов, их координаты, достоверность распознавания и типы объектов. В случае если модуль распознавания не может распознать детектированный объект, на выход модуля передаются результаты обнаружения объектов. В зависимости от режима работы системы поведение модуля распознавания также меняется. В режиме распознавания и отладочном режиме на вход модуля подается область кадра, на выходе модуля – результаты распознавания объекта. В режиме обучения на вход модуля подается изображение эталона объекта и

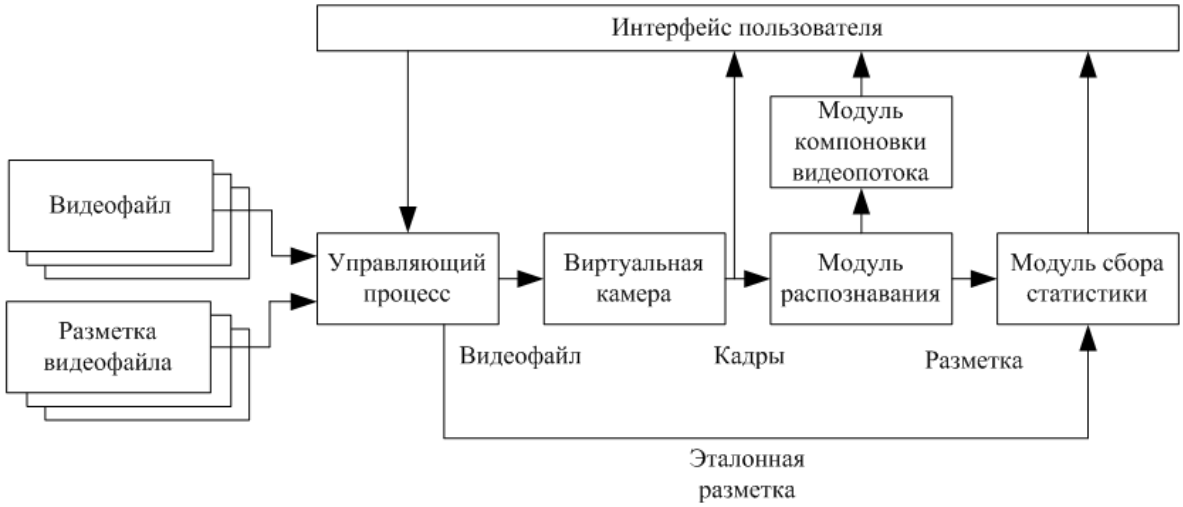


Рис. 2. Схема ПО тестирования системы обнаружения и распознавания

его класс. Указанные данные используются для обучения модели распознавания объектов определенного класса.

База данных, показанная на рис. 1, используется для хранения моделей для решения задачи обнаружения и распознавания и обучающих выборок.

В режиме распознавания предлагаемая система работает таким образом, чтобы на каждом кадре срабатывал модуль обнаружения, сопровождения или распознавания.

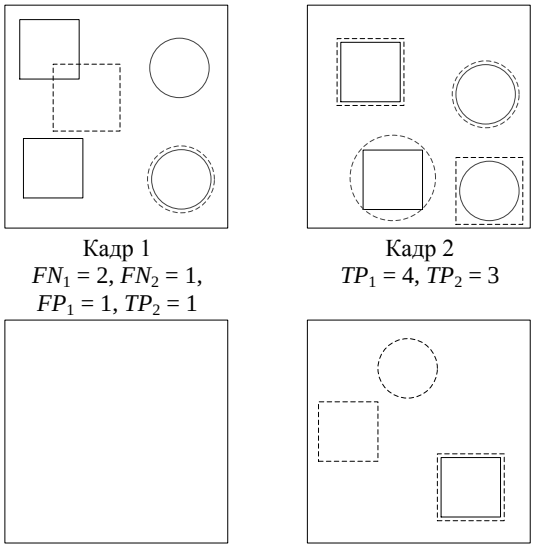
Схема программного обеспечения для тестирования системы представлена на рис. 2. Алгоритм работы данной схемы состоит в следующем:

1) из интерфейса пользователя управляющему процессу отправляется команда на выбор видеофайла и соответствующей ему разметки для тестирования;

2) видеофайл после открытия передается на виртуальную камеру, запускается модуль распознавания;

3) модуль распознавания в процессе обработки формирует видеопоток, содержащий результаты распознавания, который отображается в интерфейсе пользователя, и отправляет полученную разметку видеофайла в модуль сбора статистики.

Один из важных этапов тестирования – оценка ошибки работы системы. Предлагается оценивать величину ошибки обнаружения объекта и распознавания класса объекта. На рис. 3 показаны примеры кадров и объектов на них. Сплошной линией обозначены объекты, относящиеся к эталонной разметке, пунктирной – разметка, полученная в ходе работы модуля распознавания. Под каждым кадром подписаны параметры, характеризующие результаты обнаружения объектов: *TP* – число верно детектированных объектов, *TN* – число верно не детектированных объектов, *FN* – число ложноотрицательных обнаружений, *FP* – число ложноположительных обнаружений. Индекс у каждого параметра обозначает класс объектов: 1 – квадрат, 2 – окружность.



Кадр 1
$FN_1 = 2$, $FN_2 = 1$,
$FP_1 = 1$, $TP_2 = 1$

Кадр 2
$TP_1 = 4$, $TP_2 = 3$

Кадр 3
$TN_1 = 1$, $TN_2 = 1$

Кадр 4
$FP_1 = 2$, $FP_2 = 1$, $TP_1 = 2$

Рис. 3

Параметры точности обнаружения рассчитываются по следующим формулам:

$TNR = TN / (TN + \text{FP})$, $FNR = FN / (FN + TP)$,

$TPR = TP / (TP + FN)$, $FPR = FP / (FP + TN)$,

где *FPR* – ошибка первого рода, *FNR* – ошибка второго рода, *TNR* – вероятность верного необнаружения, *TPR* – вероятность верного обнаружения. Таким образом,

$TNR_1 = 1 / (1 + 2) = 1/3$,
$FNR_1 = 2 / (2 + 2) = 2/4$,
$TPR_1 = 2 / (2 + 2) = 2/4$,
$FPR_1 = 2 / (1 + 2) = 2/3$,
$TNR_2 = 1 / (1 + 1) = 1/2$,
$FNR_2 = 1 / (1 + 3) = 1/4$,
$TPR_2 = 3 / (3 + 1) = 3/4$,
$FPR_2 = 1 / (1 + 1) = 1/2$.

Оценка ошибки распознавания выполняется на основе матрицы ошибок.

Матрица ошибок

	Эксперимент		
Эталон		1	2
	1	2	1
	2	1	2

Число строк и столбцов такой матрицы соответствует числу классов объектов, которые могут встретиться в обрабатываемом видеопотоке. В заголовках таблицы указаны классы объектов: 1 – квадрат, 2 – окружность.

Таким образом, точность распознавания объектов класса «квадрат» равна 2 / (2 + 1) = 2 / 3, а объектов класса «окружность» – 2 / (2 + 1) = 2 / 3.

Процесс тестирования системы заключается в оценке точности ее работы на основе приведенных выше критериев на заранее размеченных (эталонных) видеофайлах.

Литература

1. *Cruz J.E.C., Shiguemori E.H., Guimaraes L.N.F.* A comparison of Haar-like, LBP and HOG approaches to concrete and asphalt runway detection in high resolution imagery // J. Comp. Int. Sci. 2015. V. 6(3). P. 121–136.

2. *Павлов В.А., Завьялов С.В., Волвенко С.В.* Анализ совместной работы методов сопровождения объектов в видеопотоке, получаемом с летательного аппарата // Юбилейная 25-я Международная конференция (GraphiCon2015), Россия, Протвино (Парк Дракино), 22–25 сентября 2015 г. 2015. С. 75–79.

Когнитивный графический образ одноканальной ЭКГ в оценке кардиогемодинамики

Е.Н. Минина

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
cere-el@yandex.ru

Изучение и моделирование реальных биосистем в рамках постнеклассической парадигмы [1] предполагает, что мы используем диагностические методы, «не навязывая Природе наше представление о ней». Основу методологии когнитивного моделирования составляет системный подход к изучению сложных систем и опора на «когнитивные способности и разрешающие возможности» конкретной методики исследования с заложенной функцией распознавания [2, 3], существующей как в реальных системах при принятии решений, так и в процессе их моделирования при реализации в диагностических технологиях. При этом динамика системного поведения в достижении положительного приспособительного результата и характеристика осуществляемых при этом процессов должна анализироваться способом, *конгруэнтным* к изменениям архитектуры функциональных систем организма, и соответствующим изменением их паттерна с выявлением характерных особенностей. Такие направления исследований всегда лежат в плоскости меж/трансдисциплинарности и несут синергетический смысл.

Со времен Н. Винера [4] известно: чтобы регулирующий блок сложной системы мог корректно осуществлять свои функции, ему необходимо обладать «образом» (моделью), «указующим перстом» [5] регулируемой системы, чтобы иметь возможность оперировать множественными обратными связями. Это позволяет оценивать ключевые параметры состояния системы в любой период времени, сравнивать их с желаемым, производить необходимую коррекцию. Так, например, концепция иммункулуса как образа, отражающего молекулярно-функциональное состояние организма в каждый данный момент времени, служит логическим продолжением и развитием гипотезы об «иммунологическом Гомункулусе», предложенной И. Коэном. Соответственно «Иммункулус» должен рассматриваться не столько в качестве пассивного «зеркала», отражающего состояние организма, сколько в качестве своеобразного «гироскопического» устройства, активно участвующего в поддержании гомеостаза [6, 7].

Вероятно, именно этот виртуальный управляющий параметр контролирует оптимальное сочетание эволюционно обусловленных механизмов детерминированной саморегуляции гомеостатической направленности и стохастической самоорганизации гомеокинеза, так как их согласование и мера выраженности являются важнейшими признаками эффективности эволюционно обусловленной системной организации. Оптимальное управление и регулирование сложной системой кардиогемодинамики, учитывая иерархичность ее строения, носит явно выраженную когнитивную процессуальность, и, помимо структурного следа адаптации [8], будет характеризоваться наличием функционального «следа» адаптации. В данном случае кодирование или ***сжатие информации***, отражая одно из множества дискретных состояний системы, будет создавать определенный образ системной динамики. Символами разкодировки в таком случае могут служить определенные системные реакции и триггерные механизмы.

Распознавание и прогнозирование (с помощью целостного когнитивного «образа» функциональной системы) вектора возможных состояний биологической системой может приводить к формированию ответа, позволяющего избежать или минимизировать внешние и/или внутренние воздействия и более адекватно осуществлять поддержание гомеостаза. «Разумный ответ» при принятии решения, а не угадывание ответной реакции в зонах бифуркаций и переходных процессах позволяет системе, обладающей элементами когнитивности, формировать более эффективное приспособление.

В связи с этим «считывание», распознавание «системных функциональных образов» с использованием инновационных технических решений позволит осуществлять задачи раннего выявления изменения вектора состояния системы.

Интеллектуально-когнитивные информационные технологии (ИТ) получают все большее распространение при решении прикладных задач, в том числе медицинской диагностики. Некоторые из возможных методик и направлений исследований, характеризуемые явно выраженными когнитивными возможностями, отражены в [9–14]. В отличие от традиционных ИТ, основанных на вычислительных процедурах обработки числовых данных, интеллектуальные ИТ оперируют обобщенными понятиями-образами, дающими более полную информацию, а анализ таких образов формирует целостную картину изучаемых явлений. Так, например, когнитивная графика реализует методы информационного моделирования и позволяет получать качественно новые знания, характеризующие системные механизмы.

Прогноз, полученный с помощью информационно-когнитивных моделей, характеризует тенденцию *развития процессов* в системе, а не значения численных показателей, которые получены путем обработки данных об уже совершившихся процессах. Важно учесть, что анализ эффективности функциональных систем организма человека может быть основан на механизмах нелинейной

динамики, которые дают возможность адекватно раскрыть и проанализировать принципы функционирования живой сложноорганизованной системы (complexity), рассматривая фазовые траектории в пространстве состояний, формируя когнитивные графические образы и *«порождая» новые признаки*, которые не дублируются другими способами анализа, а дополняют друг друга.

Для анализа и интерпретации сигналов с локально-сосредоточенными признаками привлекаются специальные ИТ, которые в той или иной мере обладают свойствами интеллекта. Одна из таких технологий разработана в Международном научно-учебном центре информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины и реализована в программно-техническом комплексе «ФАЗАГРАФ» [13]. Отличительная особенность технологии состоит в обработке сигнала в фазовом пространстве [14]. Интеллектуальные свойства инновационных алгоритмов обеспечивают дополнительные поисковые процедуры, которые направлены на автоматическое определение по самому обрабатываемому сигналу оптимальных параметров настройки фильтров. Тем самым обеспечивается адаптация ИТ к конкретному сигналу, что повышает качество его обработки, а сами фильтры обладают определенной гибкостью и взаимозаменяемостью.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что предложенный метод усреднения, предусматривающий автоматическое распознавание типичных и атипичных циклов, существенно повышает точность вычисления локально-сосредоточенных диагностических признаков и открывает новые возможности для оценки *тонких* изменений сигнала, которые недоучитываются кардиологами при традиционной ЭКГ-диагностике. Заметим, что отображение ЭКГ на фазовой плоскости $y(t)$, $y'(t)$ в форме *когнитивного графического образа (КГО) биологического сигнала* (рис. 1) принципиально отличается от других известных подходов, предусматривающих отображение ЭКГ на плоскости с координатах $y(t)$, $y(t-\tau)$, где τ – задержка во времени. Это обеспечило введение ряда дополнительных диагностических признаков, которые не использовались и не изучались ранее в цифровых электрокардиографах. К ним были отнесены параметр σ_{QRS} рассеивания точек фазовых траекторий, угол α_{QRS} ориентации усредненной фазовой траектории, показатель S_{TR}, представляющий собой отношение площадей петель зубца T и комплекса QRS усредненной фазовой траектории, параметр β_T симметрии фрагмента реполяризации усредненной фазовой траектории. Анализ и информационная значимость данных параметров КГО представлена в работах [15–21]. Было выявлено, что признаки КГО одноканальной ЭКГ в фазовом пространстве отражают электрофизиологические и метаболические особенности функционирования миокарда и могут служить прогностическими маркерами в оценке риска возникновения кардиогемодинамической патологии.

Особенность данного подхода состоит в предоставлении возможности проводить качественную оценку функционирования. Так, у людей пожилого возраста с кардиологической патологией неэффективность управления и увеличение напряжения регуляторных механизмов сопровождалась не только количественным изменением σ, но и *качественной* деформацией КГО одноканальной ЭКГ в фазовом пространстве.

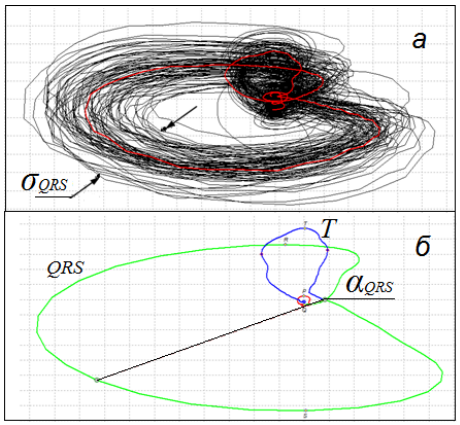


Рис. 1. Фазовый портрет ЭКГ на плоскости $y(t)$, $y'(t)$ в виде периодического аттрактора (*а*) и средний цикл фазового портрета (*б*)

На рисунке 2 изображены фазовые портреты людей пожилого возраста (*А*) и обследуемых того же возраста с кардиологической патологией (*Б*): *а* – пациентка К. с диагнозом диффузный кардиосклероз, ишемическая болезнь сердца, экстрасистолия; *б* – пациентка Н. с диагнозом ишемическая болезнь сердца, инфаркт миокарда, сердечная недостаточность, мерцательная аритмия; *в* – пациент А. с диагнозом ишемическая болезнь сердца, постинфарктный кардиосклероз, артериальная гипертония; *г* – пациент Т. с диагнозом ишемическая болезнь сердца, постинфарктный кардиосклероз, артериальная гипертония.

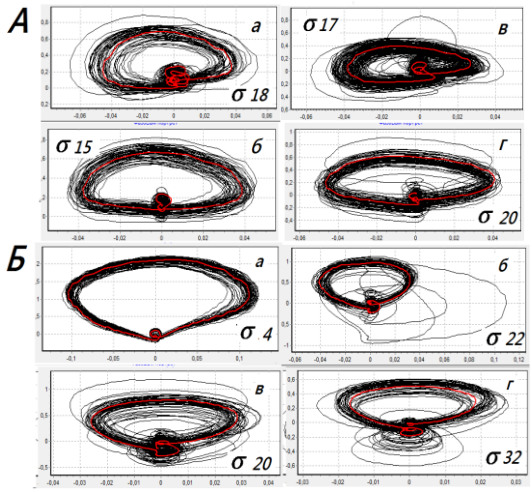


Рис. 2. Фазовые портреты ЭКГ исследуемых пожилого возраста без кардиологической патологии (*А*): *а*, *б* – женщины, *в*, *г* – мужчины, и пациентов с кардиологической патологией (*Б*): *а*, *б* – с нарушением ритма и *в*, *г* – без нарушения ритма

Изменение качественной характеристики фазового портрета были выявлены и у исследуемых разных возрастов. Так, на рис. 3 изображены фазовые портреты мальчика 6 лет (*а*) и молодого человека 20 лет (*б*) в покое и после физической нагрузки (проба Руфье) (*а*1 и *б*1 соответственно).

Как видно, незрелость регуляторных элементов приводит к невозможности определить и удержать функционирование в зоне оптимальных управляющих параметров при увеличении нагрузки, что приводит к активной поисковой деятельности при значительном увеличении σ. Это отражается на снижении эффективности управления и свидетельствует о неэкономичности процесса приспособления.

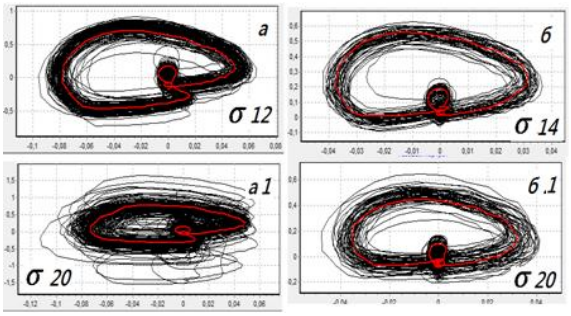


Рис. 3. Фазовые портреты и значение σ исследуемых мужского пола разного возраста в покое (*а*, *б*) и после нагрузочного тестирования (*а*1, *б*1)

Так же характер фазовых портретов в покое может носить индивидуальный характер и при одинаковом значении σ у детей одного возраста – сохранять типичную фрактальную форму либо ее терять. На рис. 4 представлены фазовые портреты девочек 9 лет при пульсе 79 уд/мин с различным уровнем тренированности.

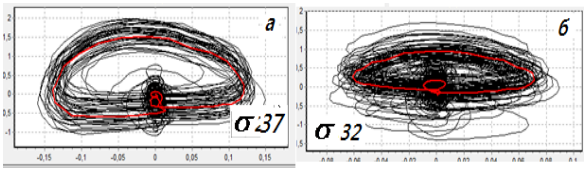


Рис. 4. Фазовые портреты девочек 9 лет (ЧСС – 79 уд/мин) с различным уровнем тренированности: *а* – тренированная; *б* – нетренированная

В процессе систематических физических тренировок функциональные системы, а сердечно-сосудистая в особенности, получают возможность *выбирать*, т. е. проявлять когнитивную активность, более эффективные управляющие параметры и пути обеспечения деятельности, что приводит к снижению цены адаптации.

КГО возможно формировать и по динамическому ряду параметров электрокардиограммы от цикла к циклу, в частности продолжительностей *R*–*R*-интервалов [22], на основании вычисления энтропии, которая характеризует меру беспорядка в системе. Согласно [23] важную информацию о свойствах системы несет не только сама энтропия, но и характер ее изменения во времени.

Как справедливо отмечается в работе [24], энтропия, в отличие от дисперсии, не зависит от значений наблюдаемой величины и поэтому характеризует не столько разброс, сколько разнообразие значений этой величины.

Для качественного и количественного анализа изменений энтропии предлагается перейти от ряда дискретных значений энтропии $H(i)$, вычисленных методом скользящего окна, к применению метода фазовой плоскости с построением фазового портрета, который дает наглядное представление о динамике изменения хаотичности наблюдаемого процесса. Фазовый портрет с получением КГО можно построить двумя способами, описанными в [25].

Несмотря на то что процедура численного вычисления производной зашумленной функции считается некорректно поставленной математической задачей, применение специальных процедур фильтрации и регуляризации [26] позволило получать приемлемые оценки производной $H(i)$ и в результате строить наглядные графические образы фазовых портретов энтропии (рис. 5). Опираясь на ряд фундаментальных представлений об общих закономерностях изменений энтропии, можно предположить, что форма фазового портрета энтропии и его «размер» в фазовом пространстве несет дополнительную информацию о системно-управляющих возможностях кардиогемодинамики.

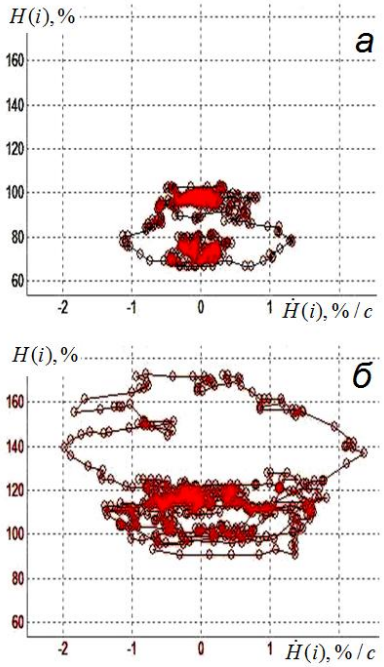


Рис. 5. Фазовые портреты энтропий *R*–*R*-интервалов спортсмена (*а*) и неспортсмена (*б*)

Выявленные признаки КГО фазового портрета энтропии *R*–*R*-интервалов характеризовались топологическим, аттракторным и объемным признаками и позволяли оценивать различия организации системы кардиогемодинамики у исследуемых с различным уровнем адаптационных резервов.

Таким образом, при компьютерной ЭКГ-диагностике важен не только сам сигнал, несущий информацию об электрических явлениях в сердце,

но и форма представления этого сигнала в виде КГО и эффективные методы извлечения диагностической информации из реальных сигналов на фоне возможных искажений и артефактов. При этом новые методологические подходы с использованием КГО одноканальной ЭКГ позволяют расширить возможности персонифицированной медицины, главная задача которой – это ранняя диагностика первых симптомов развивающейся патологии, превентивные меры по устранению этих первичных признаков.

Литература

1. *Стёпин В.С.* Синергетика и системный анализ // Синергетическая парадигма. М. : Прогресс : Традиция, 2004.

2. *Gorelova G.V.* [*et al.*] Experience in cognitive modeling of complex systems // Cubernetics and Systems – 2010 : Proceedings of the 20-th European Meeting on Cybernetics and Systems Research. Vienna, 2010. P. 220–223.

3. *Анохин К.В.* Когнитом: сетевое расширение теории функциональных систем // Современные проблемы системной регуляции физиологических функций : материалы конференции. 2015. С. 3–5.

4. *Винер Н.* Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. М. : Советское радио, 1958. 216 с.

5. *Zaichik A.Sh., Churilov L.P., Utekhin V.J.* Autoimmune regulation of genetically determined cell functions in health and disease // Pathophysiology. 2008. V. 15(3). P. 191–207.

6. *Cohen I.R., Young D.B.* Autoimmunity, microbial immunity and the immunological homunculus // Immunol. Today. 1991. V. 12. P. 105–110.

7. *Полетаев А.Б.* Физиологическая иммунология: естественные аутоантитела и проблемы наномедицины. М. : Миклош, 2010. 218 с.

8. *Меерсон Ф.З., Пшенникова М.Г.* Адаптация к стрессорным ситуациям и физическим нагрузкам. М. : Медицина, 1988. 256 с.

9. *Луценко Е.В.* Автоматизированный системно-когнитивный анализ в управлении активными системами. Краснодар : КГАУ, 2002. 605 с.

10. *Горелова Г.В., Верба В.А., Захарова Е.Н.* Процесс принятия решений и его поддержка на основе когнитивного моделирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2005. № 10 (54). С. 13–20.

11. *Еськов В.М., Живогляд Р.Н., Карташова Н.М., Попов Ю.М., Хадарцев А.А.* Понятие нормы и патологии в фазовом пространстве состояний с позиций компартентно-кластерного подхода // Вестник новых медицинских технологий. 2005. Т. 12, № 1. С. 12–14.

12. *Хромушин В.А., Бучель В.Ф., Жеребцова В.А., Честнова Т.В.* Программа построения алгебраических моделей конструктивной логики в биофизике, биологии и медицине // Вестник новых медицинских технологий. Тула : НИИ новых медицинских технологий, 2008. № 4. С. 173 –174.

13. *Файнзильберг Л.С.* Компьютерная диагностика по фазовому портрету электрокардиограммы. Киев : Освита Украины, 2013. 190 с.

14. *Файнзильберг Л.С.* Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика. Киев : Наукова думка, 2008. 333 с.

15. *Минина Е.Н., Файнзильберг Л.С.* Фазовый портрет одноканальной ЭКГ в оценке функциональных резервов сердечно-сосудистой системы // Вестник новых медицинских технологий. 2014. Т. 21, № 3. С. 22–27.

16. *Минина Е.Н.* Новый подход в изучении взаимосвязи функциональной подготовленности и электрогенеза у спортсменов с использованием эталонного кардиоцикла // Вестник новых медицинских технологий : [Электронное издание]. 2014. № 1. Публ. 1–8. URL: http://medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2014-1/4931.pdf. (Дата обращения: 03.07.2014).

17. *Минина Е.Н.* Возможности оценки процессов реполяризации миокарда с использованием эталонного кардиоцикла // Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2015. Т. 1 (67), № 4. С. 26–35.

18. *Минина Е.Н.* Анализ волны *T* ЭКГ в фазовом пространстве в определении функциональных резервов миокарда // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. 2013. Т. 26 (65), № 2. С. 148–153.

19. *Файнзильберг Л.С., Минина Е.Н.* Исследование диагностической ценности угла ориентации фазового портрета одноканальной ЭКГ как индикатора функционального состояния миокарда // Клиническая информатика и телемедицина. 2013. Т. 9, № 10. С. 33–42.

20. *Файнзильберг Л.С.*, *Минина Е.Н.* Оценка функционального состояния сердечно-сосудистой системы по величине разброса фазовых траекторий одноканальной ЭКГ // Кибернетика и вычислительная техника. 2014. № 1. С. 5–19.

21. *Минина Е.Н.*, *Файнзильберг Л.С.* Анализ функционального состояния сердечно-сосудистой системы по совокупности признаков фазового портрета одноканальной ЭКГ // Российский кардиологический журнал. 2015. Т. 12 (128). С. 7–13.

22. *Frank B., Pompe B., Schneider U., Hoyer D.* Permutation entropy improves fetal behavioural state classification based on heart rate analysis from biomagnetic recordings in near term fetuses // Medical & Biological Engineering & Computing. 2006. № 44. P. 179–187.

23. *Дурнова Н.Ю., Довгалевский Я.П., Бурлака А.Н., Киселев А.Р., Фурман Н.В.* Изучение зависимостей между показателями вариационной пульсометрии, энтропии ритма сердца, временного и спектрального анализов вариабельности ритма сердца в норме и при ишемической болезни сердца // Саратовский научно-медицинский журнал. 2011. Т. 7, № 3. С. 608–611.

24. *Горбань И.И.* Энтропия неопределенности // Математические машины и системы. 2013. № 2. С. 105–117.

25. *Минина Е.Н., Файнзильберг Л.С.* Анализ кардиогемодинамического функционирования с использованием энтропийного подхода и метода фазовой плоскости // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 4. С. 5–17.

26. *Файнзильберг Л.С., Ориховская К.Б., Ваховский И.В.* Оценка хаотичности формы фрагментов одноканальной электрокардиограммы // Кибернетика и вычислительная техника. 2016. Вып. 183. С. 4–24.

Динамика психофизиологической системы в условиях стресса у спортсменов при физической нагрузке

М.М. Некрасова[1], И.В. Федотова[3], Т.В. Блинова[3], С.Б. Парин[2], С.А. Полевая[1]

[1]Нижегородская государственная медицинская академия
[2]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
[3]Нижегородский научно-исследовательский институт гигиены и профпатологии
s453383@mail.ru

Стресс является защитной реакцией организма, неспецифическим, стадийным, динамически развивающимся процессом в ответ на угрозу или чрезмерные нагрузки [1, 2]. Основными стресс-реализующими системами являются: симпато-адреналовая система (САС), гипаталамо-гипофизарно-адреналовая система (ГГАС) и эндогенная опиоидная система (ЭОС) [1, 2]. При стрессе все три системы включаются одновременно, оказывая взаимное регулирующее влияние, при этом на каждой стадии стресса отмечается доминирование одной из систем. САС обеспечивает реализацию первой стадии стресса (стадия тревоги), регистрируется увеличение концентрации адреналина, норадреналина. Нарастание активности ГГАС отмечается на стадии резистентности, маркерами являются кортизол, адренокортикотропный гормон (АКТГ). Гипобиотическое состояние организма во многом определяется доминированием ЭОС на стадии истощения, которая также является регулируемым процессом, при этом активность ЭОС носит двухфазный характер, первый пик регистрируется в начальной стадии стресса (увеличивается содержание эндогенных опиоидных пептидов) [1]. В спорте высших достижений спортсмены испытывают колоссальные нервно-эмоциональные и физические нагрузки, которые могут приводить к катастрофическим последствиям для их здоровья. Чтобы не допускать чрезмерного напряжения, необходимо осуществлять контроль функционального состояния (ФС) спортсменов. В настоящее время активно развивается диагностика ФС спортсменов на основе данных вариабельности сердечного ритма (ВСР) [3]. При оценке ФС спортсменов необходимо учитывать изменение активности стресс-реализующих систем.

Целью работы являлось изучение динамики психофизиологических и биохимических показателей стресса при физической нагрузке у спортсменов.

Материалы и методы исследования

В исследовании при добровольном информированном согласии принимали участие 90 спортсменов (66 юношей и 24 девушки, возраст 14–24 лет), занимающиеся академической греблей, волейболом и бадминтоном. Проводился анализ содержания в крови биохимических маркеров повреждения кардиомиоцитов и клеток скелетной мускулатуры (кардиоспецифического белка тропонина-1 (Тр-1), миоглобина (МГ), креатинфосфокиназы фракции МВ (КК-МВ)), маркеров активации стресс-реактивных систем (АКТГ, адреналина), ферментов (аспартатаминотрансферазы (АСАТ), аланинаминотрансферазы (АЛАТ), общей лактатдегидрогеназы (ЛДГ)); исследования ВСР, ЭКГ, артериального давления (АД); регистрировали психофизиологические показатели с помощью компьютерных технологий латерометрии (измерение дифференциальных порогов звуколокализации) и кампиметрии (измерение дифференциальных порогов цветоразличения) [4, 5]. Исследования проводились в стационарных условиях через 12 ч после тренировки в периоды значительной физической нагрузки (соревновательный период) и сниженных нагрузок (активного отдыха). Также были проведены 108 натурных измерений ВСР в процессе тренировки с помощью разработанного комплекса для телеметрии сердечного ритма. Для непрерывных телеметрических измерений сердечного ритма в условиях естественной деятельности использовали разработанный комплекс, состоящий из беспроводного датчика ЭКГ Zephyr Bio Harness и смартфона с операционной системой Android и специализированным программным обеспечением «HR-Reader» [5, 6]. Конструкция датчика ЭКГ обеспечивает надежную фиксацию его на теле человека и не создает неудобств. Передача данных на смартфон организована по беспроводному каналу Bluetooth.

При анализе результатов исследования вычислялись спектральные показатели вариабельности сердечного ритма (ВСР): суммарная мощность спектра – TP ($мс^2$); мощность спектра в области высоких частот, HF ($мс^2$), отражает влияние парасимпатического отдела вегетативной 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].

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. Фиксировались продолжительность и количество стресс-реакций за время мониторинга.

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием программного пакета Statistica 6.0.

Результаты

В период значительных тренировочных нагрузок у спортсменов-гребцов достоверно чаще регистрировали превышение референтных уровней биохимических маркеров (рис. 1).

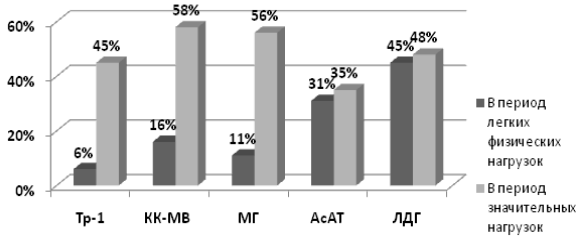


Рис. 1. Доля спортсменов с превышением референтных уровней биомаркеров в период легких и значительных физических нагрузок

При изучении взаимозависимых изменений психофизиологических характеристик и биохимических маркеров было отмечено следующее. Увеличение концентрации в крови адреналина сопровождается повышением дифференциального порога латерализации звука в правом полушарии по коэффициентам функциональной межполушарной асимметрии головного мозга (ФМПА), характеризующим лабильность (As-min) и возбудимость (As-max) (рис. 2, *а*, *б*).

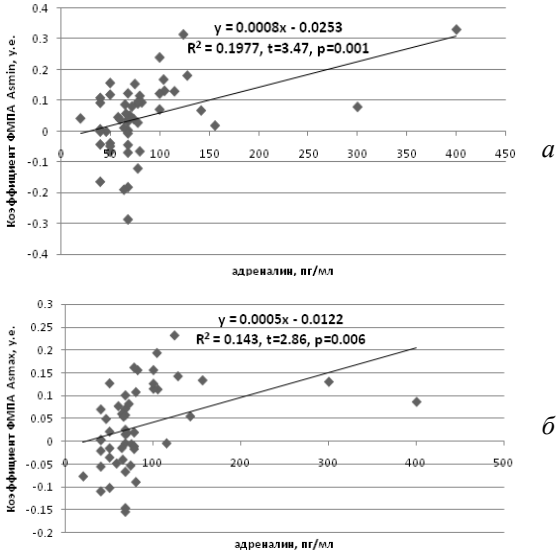


Рис. 2. Зависимость между концентрацией адреналина в крови спортсменов и значением коэффициентов ФМПА As-min (*а*) и As-max (*б*)

Положительная корреляция отмечается и при изменении значений коэффициентов ФМПА и концентрации кортизола в крови спортсменов (рис. 3).

Повышение кортизола коррелирует с возрастанием общей мощности спектра (ТР) ВСР при активной ортостатической пробе (r = 0,33, p = = 0,02). Положительная корреляционная связь отмечается между АКТГ и индексом вегетативного баланса (ИВБ) (r = 0,35, p = 0,01).

На стадии истощения функциональных ресурсов регистрируется снижение ТР ВСР, ФМПА по показателям латерометрии, превышение содержания АСАТ, АЛАТ, КК-МВ, ЛДГ, МГ, МК, увеличение АДД, дифференциальных порогов цветоразличения в красном и синем базовом оттенке по показателям кампиметрии. На данной стадии фиксируются корреляции между биохимическими и психофизиологическими показателями. Так, у лиц с выявленными признаками стресса по показателям латерометрии и кампиметрии в крови регистрируется повышенное содержание АЛАТ (r = 0,36, p = 0,04; r = 0,30, p = 0,03). Положительная корреляция наблюдается между концентрацией КК-МВ (r = 0,42, p = 0,03) и дифференциальным порогом цветоразличения в красном базовом оттенке, повышение которого указывает на эмоциональное истощение.

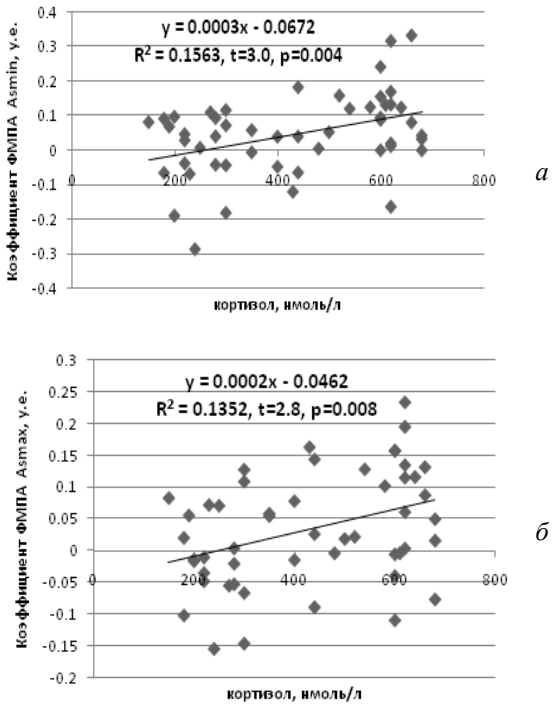


Рис. 3. Зависимость между концентрацией кортизола в крови спортсменов и значением коэффициентов ФМПА As-min (*а*) и As-max (*б*)

В фазу восстановления возрастает содержание гормона эритропоэтина и снижается ИВБ (r = −0,36, p = 0,008).

Непосредственно в процессе тренировки проводили регистрацию реакций острого стресса с помощью разработанного метода беспроводной кардиоинтервалографии.

Продолжительность и число стресс-реакций за период тренировки характеризует степень хронизации стресса в условиях профессиональной деятельности у спортсменов. Индекс стрессовой нагрузки (ИСН) рассчитывали как отношение продолжительности всех стрессовых реакций (t_{si}) к времени записи (T_z):

$$ИСН = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{si}}{T_z}. \quad (1)$$

По показателю ИСН были определены допустимые уровни нагрузки для каждого конкретного спортсмена, типы тренировочных нагрузок, не приводящие к возрастанию стрессового напряжения.

Стрессовую нагрузку характеризует также интенсивность развития стресс-реакций (S, стр/мин), которая выражается как отношение количества стресс-реакций (N_s) к времени записи (T_z):

$$S = N_s / T_z. \quad (2)$$

У спортсменов, у которых во время тренировки были зафиксированы высокие значения стрессовой нагрузки и интенсивности стрессовых реакций, достоверно чаще регистрировали повышенное содержание в крови Тр-1 (p = 0,049) и выраженную синусовую аритмию (p = 0,04) через 12 ч после тренировки.

С увеличением длительности тренировки средняя продолжительность стресс-реакции достоверно увеличивается (r = 0,64, p = 0,004) и количество стрессов достоверно возрастает (r = 0,58, p = 0,012). После более продолжительных тренировочных занятий в крови достоверно возрастает содержание КК-МВ (r = 0,5, p = 0,035) и снижается содержание эритропоэтина (r = −0,57, p = 0,015). Через 12 часов после тренировок на ЭКГ у спортсменов чаще регистрируется синусовая аритмия (r = 0,5, p = 0,039). Увеличение средней продолжительности стресс-реакции происходит при брадикардии (r = 0,64, p = 0,004). По мнению специалистов, синусовую аритмию у спортсменов следует рассматривать как защитную реакцию на нагрузки, в то время как выраженная синусовая аритмия, особенно в сочетании с чрезмерной активацией парасимпатического отдела нервной системы, связана с перенапряжением систем регуляции [7]. В нашем исследовании выраженная синусовая аритмия достоверно чаще регистрировалась при повышенных уровнях АСАТ (r = 0,58, p = 0,001) и КК-МВ (r = 0,48, p = 0,008). При значительных уровнях КК-МВ у юных спортсменов чаще регистрируется на ЭКГ синдром наджелудочкового гребешка (признак нарушения проводимости правой ножки пучка Гиса) (r = 0,43, p = 0,02).

В ходе исследования были определены значения показателей ИСН и интенсивности S, указывающие на значительное перенапряжение ФС спортсмена в процессе тренировки:

	$(M \pm \sigma)$
ИСН, у. е.	0,30 ± 0,04
S, стр/мин	0,22 ± 0,04

После коррекции тренировочной нагрузки показано достоверное улучшение биохимических показателей и снижение частоты встречаемости неблагоприятных ЭКГ-признаков (рис. 4).

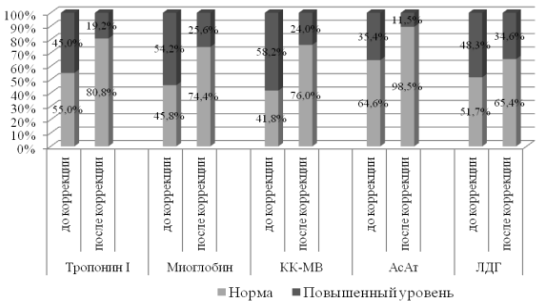


Рис. 4. Характеристика состояния сердечно-сосудистой системы спортсменов группы риска до и после коррекции физических нагрузок по данным комплекса биохимических показателей

Выводы:

1) Значительные физические нагрузки приводят к перенапряжению сердечно-сосудистой системы спортсменов.

2) Изучение комплекса биохимических и психофизиологических показателей позволяет дать более полную и объективную оценку состояния ФС спортсменов с учетом динамики развития стресса при физических и эмоциональных нагрузках.

3) Разработанный метод беспроводной регистрации показателей ВСР позволяет проводить персонифицированный мониторинг ФС спортсмена непосредственно в процессе тренировки, что способствует снижению риска перетренированности и истощения функциональных резервов и сохранению здоровья спортсменов.

Литература

1. *Парин С.Б.* Нейрохимические и психофизиологические механизмы стресса и шока // Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород : ННГУ, 2001. С. 20–28.

2. *Парин С.Б., Полевая С.А.* Трехкомпонентная концепция нейрохимических механизмов стресса и шока: от экспериментов к математическому моделированию // Физиология и здоровье человека : науч. тр. II съезда физиологов СНГ. М. ; Кишинэу : Медицина : Здоровье, 2008. С. 234–235.

3. *Шлык Н.И.* [*и др.*] Индивидуальный подход к анализу вариабельности сердечного ритма у легкоатлетов на сборах в условиях среднегорья // Ритм сердца и тип вегетат. регуляции в оценке уровня здоровья населения : мат. 6-го Всерос. симп. с межд. участ. / отв. ред. Н.И. Шлык, Р.М. Баевский. Ижевск, 2016. 326 с.

4. *Полевая С.А.* Интеграция эндогенных факторов в систему обработки экстероцептивных сигналов : автореф. дис. … докт. биол. наук. Пущино, 2009.

5. *Полевая С.А.* [*и др.*] Телеметрические и информационные технологии в диагностике функционального состояния спортсменов // Соврем. технологии в медицине. Н. Новгород : НижГМА, 2012. № 4. С. 94–98.

6. *Некрасова М.М., Полевая С.А., Парин С.Б., Шишалов И.С., Бахчина А.В.* Способ определения стресса : патент Российской Федерации RU 2531443. 2014.

7. *Михайлов В.М.* Вариабельность ритма сердца: опыт практического применения метода. Иваново : Иван. гос. мед. академия, 2002. 290 с.

Возможные подходы к моделированию нестандартного познавательного поведения животных

В.А. Непомнящих[1], В.Г. Редько[2]

[1]Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, п. Борок, Ярославская область
nepom@ibiw.yaroslavl.ru
[2]НИИ системных исследований РАН, Москва
vgredko@gmail.com

Введение

В работе анализируются подходы к моделированию нестандартного познавательного поведения животных. Обсуждаются следующие вопросы, характеризующие когнитивные способности животных. Как животное делает предсказания будущих событий? Как эти предсказания используются при формировании поведения? Когда животное осуществляет тестовые действия? Как на основе тестовых действий формируются знания и предсказания? Как животное использует собственные «орудия труда» при целенаправленном поведении? Когда животное изготавливает эти «орудия»? Как формируется сложное поведение из отдельных элементов поведения?

Анализ будем вести на основе экспериментальных исследований биологов и собственных начальных шагов моделирования нестандартного поведения животных. Рассмотрение будем вести на основе анализа поведения достаточно простых животных: рыб, попугаев, ворон.

Гениальные птицы

Сначала остановимся на интересных и нетривиальных экспериментах, представленных в научно-популярном фильме «Клюв и мозг. Гениальные птицы» [1]. В фильме рассказывается о поведении попугаев кеа (из Новой Зеландии) и новокаледонских ворон. В частности, приводятся результаты двух экспериментов.

В первом эксперименте орнитолог Гевин Хант (Gavin Hunt, The University of Auckland, New Zealand) непосредственно в лесу приготовил специальный «обеденный стол» для новокаледонских ворон: толстый кусок ствола дерева с просверленными достаточно тонкими отверстиями. В отверстия орнитолог положил кусочки мяса (пищу ворон). Отверстия были достаточно глубокими, так что вороны не могли достать пищу клювом. Сам орнитолог спрятался в палатке и наблюдал за воронами. Вороны прилетели к «столу» не сразу. По-видимому, вороны проявили сначала осторожность. Но потом вороны прилетели, стали изготавливать орудия для добычи пищи (палочки из веточек и стеблей растений) и научились с помощью достаточно длинных палочек (а еще лучше с помощью палочек с крючком на конце) доставать пищу из глубоких отверстий. Подробней см. фильм [1].

Во втором эксперименте было одновременно проведено два опыта: с попугаями кеа и с новокаледонскими воронами. И те и другие птицы должны были решать одни и те же задачи. Эксперименты проводились в Европе в двух местах на расстоянии 500 км друг от друга. Эксперименты проводили Алиса Ауершперг (Alice M.I. Auersperg, University of Veterinary Medicine, Vienna, Austria) и Августа фон Байерн (Auguste M.P. von Bayern, Max Planck Institute for Ornithology, Pocking, Germany). Птицам в лабораторных условиях давали задание добыть пищу из довольно сложного экспериментального устройства, используя простые орудия: веревочки, палочки, шары, камешки. Такие орудия были разбросаны возле экспериментальной установки. Причем до решения надо было догадаться просунуть палочку в нужное место установки, протолкнуть шар в подходящее отверстие или кинуть камешек в соответствующее место, чтобы камешек вытолкнул пищу из установки. То есть и попугаи и вороны должны были решить достаточно сложные задания. Используемые экспериментальные устройства были сделаны из прозрачного пластика, так что птицы хорошо видели свою цель. В фильме «Клюв и мозг» это представлено как соревнование между попугаями и воронами. В результате и попугаи и вороны успешно решили все предложенные им задания. Получилось это не с первого раза, были и пробные неудачные попытки, но в конце концов птицы успешно справились с предложенными им заданиями. Этот эксперимент показал, что попугаи кеа и новокаледонские вороны имеют примерно одинаковый уровень догадливости, одинаковый и достаточно высокий уровень когнитивных способностей. Подробнее об эксперименте см. [1].

Итак, очерченные эксперименты показывают, что попугаи кеа и новокаледонские вороны обладают интересными и нетривиальными когнитивными способностями. Часто они тестируют ситуации, познают внешний мир и свое взаимодействие с внешним миром, а потом используют полученное знание при целенаправленном поведении. Теперь перейдем к начальным моделям, характеризующим это когнитивное поведение.

Модель планирования новокаледонских ворон

Кратко рассмотрим модель, основанную на биологическом эксперименте с новокаледонскими воронами [2]. В этом эксперименте вороны предварительно обучались выполнению отдельных элементов довольно сложного поведения. После

обучения воронам предлагалось решить следующую трехзвенную проблему: 1) подтянуть привязанную на шнуре короткую палочку и освободить ее от шнура, 2) с помощью короткой палочки достать длинную палочку из зарешеченного контейнера, 3) длинной палочкой извлечь пищу из второго глубокого прозрачного контейнера. При этом невозможно было извлечь пищу из глубокого контейнера с помощью короткой палочки или клюва и извлечь длинную палочку из зарешеченного контейнера клювом. Поэтому, чтобы добыть пищу, вороне надо было выполнить четко определенную цепочку указанных последовательных действий: 1→ 2 → 3.

Итак, вороны обучались отдельным элементам поведения, направленного на решение трехзвенной проблемы. А затем самостоятельно мысленно планировали полностью все это поведение, мысленно связывая отдельные элементы в единую цепочку.

В работах [3, 4] строилась модель мысленного формирования плана поведения, нацеленного на решение трехзвенной проблемы. Предполагалось, что механизм формирования плана решения трехзвенной проблемы включает в себя следующие этапы:

1) прямое мысленное рассмотрение от исходной ситуации к целевой (до тех пока не будет найдена правильная цепочка действий, ведущих к цели);

2) проверка найденного решения путем тестирующего обратного и прямого мысленного рассмотрения;

3) генерация стереотипа целенаправленного поведения после тестирования.

Предполагалось, что вороны используют предсказания вида

$$\{S_{current}, A_{current}\} \rightarrow S_{next}\,, \qquad (1)$$

где $S_{current}$ и $A_{current}$ – текущие ситуация и действие, S_{next} – следующая ситуация, в которую ворона попадет после выполнения действия $A_{current}$. Некоторым из этих предсказаний вороны обучаются в результате предварительного обучения, а часть предсказаний формировалась позже, в процессе формирования плана решения всей трехзвенной проблемы.

Считалось, что при прямом мысленном рассмотрении вороны анализируют возможности достижения цели, исходя из исходной ситуации. При этом вороны могут тестировать мысленно или реально пробовать отдельные действия и догадываться с определенными вероятностями до нужных предсказаний вида (1). В модели предполагалось, что формируются уверенности в предсказаниях, которые увеличиваются/уменьшаются при правильном/неправильном предсказании. Если сразу решение не найдено, то происходит повтор прямого мысленного рассмотрения.

После первого нахождения результата происходит его проверка, при этом при тестирующем обратном мысленном рассмотрении оцениваются расстояния между текущими ситуациями и целевой (такое расстояние – это число действий, необходимое для достижения цели из рассматриваемой ситуации).

При успешной проверке формируется база знаний, характеризующая ситуации, действия, предсказания результатов действий, оценки расстояний между текущими ситуациями и целевой ситуацией. Для надежности проводится и тестирующее прямое мысленное рассмотрение, которое уже использует базу знаний. На основе базы знаний строится план решения трехзвенной проблемы. При этом выбираются действия, приводящие к уменьшению расстояния до цели.

Отметим, что в модели была введена проверка полученного результата путем обратного и прямого тестирующего мысленного рассмотрения. Это тестирование подобно быстрому обратному (а возможно, и прямому) возбуждению клеток места в гиппокампе животных после достижения результата путем перемещения в пространстве [5, 6]. Возможно, что такая проверка играет важную роль в надежном запоминании полученного решения.

После проверки формируется стереотип целенаправленного поведения. При выполнении действий в соответствии со стереотипом уже не нужны мысленные усилия для формирования плана поведения, следовательно стереотипное поведение должно происходить быстро.

Было проведено компьютерное моделирование по очерченной схеме формирования планов воронами. Результаты моделирования качественно согласуются с биологическим экспериментом [2].

Подчеркнем, что в этой модели важную роль играют тестовые действия, которые мысленно или реально совершают модельные вороны в процессе прямого мысленного рассмотрения. Также в фильме [1] явно чувствуется, что «гениальные птицы» часто делают пробные, тестовые действия. Как бы они считают: «А попробую такое действие, и посмотрим, что получится». Это близко к предположению работы [7], в которой считается, что выполнение действия начинается до наблюдения внешней среды. То есть в когнитивном поведении пробы, тесты, попытки сделать что-то новое играют важную роль.

Модели познавательных способностей рыб, изучающих лабиринты

Отметим еще важные особенности когнитивного поведения, охарактеризованные в моделях рыб, изучающих лабиринты [4, 8]. Модели основаны на биологическом эксперименте [8], в котором изучалось поведение рыб в незнакомой им среде.

Была построена модель накопления рыбами знаний о коридорах лабиринта. Считалось, что модельная рыба имеет определенное знание K_i о каждом из коридоров, в момент посещения агентом i-го коридора величина K_i становится равной 1, а для остальных коридоров величины K_i постепенно уменьшаются.

Также была построена компьютерная модель, в которой рассчитывалась уверенность модельных рыб в предсказании будущих ситуаций вида (1). Уверенности увеличивались/уменьшались при правильном/неправильном предсказании.

Кроме этого была построена гипотетическая модель, предполагавшая, что после определенного освоения лабиринта рыба способна сформировать некоторые обобщенные понятия, характеризующие места в этом лабиринте. В этой модели предполагается, что модельная рыба уже хорошо освоила лабиринт, т. е. рыба уже имеет сформированные знания K_i для всех обобщенных ситуаций и уверенности в предсказаниях для всех возможных цепочек вида (1). Используя эти знания K_i и уверенности, рыба может создать план движения к месту, для которого величина K_i минимальна, т. е. к тому месту, которое она давно не посещала.

Модельная рыба формирует план, сначала мысленно анализируя пути движения от целевой ситуации к исходной. В результате у рыбы создается база знаний, которая характеризует ситуации, действия, предсказания результатов действий, оценку расстояний между текущими ситуациями и целевой ситуацией (это расстояние равно числу действий, необходимых для перехода из текущей ситуации в целевую). Используя эту базу знаний, рыба формирует план движения от исходной ситуации к целевой.

Заключение

Оценивая общие свойства рассмотренных моделей, можно выделить следующие характерные черты рассмотренных модельных организмов:

1) тестирование возможных действий, получение знаний о результатах действий;

2) оценка знаний о каждой из возможных ситуаций;

3) движение к ситуации, знания о которой минимальны. Тем самым модельный организм может самостоятельно формировать новые текущие цели своего поведения. Например, рыба в лабиринте может решить двигаться в тот коридор, для которого знания минимальны, т. е. в тот коридор, который она давно не посещала;

4) формирование предсказаний о результатах действий; оценка уверенности в предсказаниях, стремление к надежным предсказаниям, уверенность в которых высока;

5) формирование простой базы знаний, характеризующей ситуации, действия, прогнозы результатов действий, оценки расстояний между текущими ситуациями и целевой ситуацией;

6) использование базы знаний при планировании целенаправленного поведения;

7) прямые и обратные мыслительные процессы (от исходной ситуации к целевой и обратно);

8) формирование стереотипа целенаправленного поведения.

Подчеркнем, что в нашем докладе очерчены только начальные модели нетривиального когнитивного поведения животных. Однако явно видны перспективы дальнейшего моделирования нетривиальных познавательных способностей животных [9].

Литература

1. American Public Television. Beak and brain: genius birds from down under. URL: https:// www.aptonline.org/ catalog.nsf/vLinkTitle/BEAK+AND+BRAIN+GENIUS+ BIRDS+FROM+DOWN+UNDER. [Клюв и мозг. Гениальные птицы. URL: https://www.youtube.com/watch?v=-8b_ xY8tpQQ].

2. *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.

3. *Red'ko V.G., Burtsev M.S.* Modeling of mechanism of plan formation by New Caledonian crows // Procedia Computer Science. 2016. V. 88. P. 403–408 ; http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S1877050916317124.

4. *Редько В.Г., Непомнящих В.А., Бурцев М.С.* Биологически инспирированные модели когнитивных автономных агентов // Пятнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием «КИИ-2016» : труды конференции. Смоленск, 2016. Т. 2. С. 283–291.

5. *Foster D.J., Matthew A., Wilson M.A.* Reverse replay of behavioural sequences in hippocampal place cells during the awake state // Nature. 2006. V. 440, № 7084. P. 680–683.

6. *Diba K., Buzsaki G.* Forward and reverse hippocampal place-cell sequences during ripples // Nature Neuroscience. 2007. V. 10, № 10. P. 1241–1242.

7. *Georgeon O.L., Casado R.C., Matignon L.A.* Modeling biological agents beyond the reinforcement-learning paradigm // Procedia Computer Science. 2015. V. 71. P. 17–22 ; http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S1877050915036406.

8. *Red'ko V.G., Nepomnyashchikh V.A., Osipova E.A.* Models of fish exploratory behavior in mazes // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2015. V. 13. P. 9–16.

9. *Редько В.Г.* Моделирование когнитивной эволюции : на пути к теории эволюционного происхождения мышления. М. : ЛЕНАНД : URSS, 2015. 256 с.

Маршрутизация информации в многослойных нейронных сетях головного мозга в контексте межполушарной асимметрии на примере алкогольной зависимости

Ю.В. Никонов

ФГБУЗ МСЧ № 59 ФМБА России, г. Заречный, Пензенская область
nikyuv@yandex.ru

В данных тезисах анализируется моделирование «скрытой геометрии» [11, 12] многослойных, в том числе двухслойных, нейронных сетей (один слой из которых может соответствовать левому полушарию головного мозга, а другой – правому) [5], обладающих гиперболическими свойствами [7, 8, 13, 15] в контексте межполушарной асимметрии головного мозга [3, 4, 6] на примере этанол-зависимой функциональной системы (ЭЗФС). Рассматривается влияние на передачу информации по нейронным сетям головного мозга в процессе купирования алкогольного абстинентного синдрома (ААС) и становления ремиссии алкогольной зависимости (АЗ; психические и поведенческие расстройства, вызванные употреблением алкоголя, – синдром зависимости по МКБ-10) [1] обнаруженных недавно [11, 12] эффектов многослойных сетей: наличие «геометрической корреляции» узлов разных слоев и «взаимной жадной маршрутизации» (ВЖМ) (mutual greedy routing).

Для осуществления целей работы проведен анализ и интерпретация литературных данных междисциплинарных исследований по моделированию сложных многослойных сетей, в том числе нейронных сетей полушарий головного мозга, в контексте функциональной асимметрии головного мозга (ФА ГМ) в динамике (АЗ) [3, 4, 6].

Доказано [8, 9, 13], что сложные сети могут обладать гиперболическими свойствами, причем координаты узлов таких сетей и вероятности их связей определяются их «популярностью» и «сходством» [16]. В работах [11, 12] показано, что узлы в двухслойных – многослойных сетях имеют гиперболические свойства, а также свойство геометрической корреляции. Примером многослойных нейронных сетей являются и нейронные сети ЭЗФС. Есть основания полагать [18], что каждый слой такой сети может обладать свойствами «малого мира» (small worlds).

Маршрутизация информации [13, 15] наблюдается во многих естественных и искусственных сложных сетях. Для того чтобы найти правильный маршрут через сложную сеть, обладающую свойствами малого мира, узлам нейросети достаточно «знать» только свои гиперболические координаты и гиперболические координаты соседей [18]. Узлы сложной сети находят оптимальный путь, просто ретранслируя информацию своему ближайшему соседу-узлу в нужном направлении. Этот процесс называют жадной маршрутизацией (ЖМ). Оптимальному пути в такой сложной сети соответствует гиперболическая геодезическая между источником информации и пунктом ее назначения.

Установлено, что ЖМ информации в многослойных сетях эффективней этого процесса в сетях «однослойных» [11]. В процессе ЖМ узел пересылает сообщение-сигнал своим соседям, находящимся ближе всего (на минимальном гиперболическом расстоянии) по назначению, в любой из слоев, включенных в подобную систему (в многослойных сетях этот процесс назван ВЖМ). В нейронных сетях мозга, вероятно, этому соответствуют взаимодействия узлов двух полушарий. Авторы концепции ВЖМ [12] использовали моделирование сетей, чтобы показать, что геометрическая корреляция улучшает навигацию в многослойных сетях, если эта корреляция достаточно сильна (есть все основания полагать, что геометрическая корреляция [9, 17] между соответствующими областями полушарий головного мозга человека именно такова). Разрабатывается гипотеза [5]: степени геометрической корреляции нейронных узлов двух полушарий соответствует выраженность межполушарной симметрии-асимметрии.

Важно, что скорость передачи сигнала от узла к узлу в рамках модели определяется не физическим евклидовым расстоянием между ними, но гиперболическим расстоянием в математическом, гиперболическом пространстве. Наличие геометрической корреляции и явление ВЖМ, естественно, объясняют только малую часть свойств двух полушарий мозга человека, причем свойств, вероятно, общих с «парным» мозгом животных. Можно предположить, что большая скорость передачи информации в «парном» мозге из-за ВЖМ дает некоторое эволюционное преимущество по сравнению с «однослойным» непарным мозгом. В этом контексте весьма вероятно, что при ряде патологических процессов с нарушением функций центральной нервной системы (ЦНС), нарушающих межполушарные взаимодействия, нарушается и ВЖМ. Коллективом авторов [9] на основе применения новых методик изучения мозга проведено изучения «здорового» и патологического (при болезни Паркинсона) коннектомов. Коннектом (с учетом узлов правой и левой гемисфер мозга) моделируется с помощью вложения в 2D (диск Пуанкаре с угловыми и радиальными координатами) и 3D гиперболическое пространство. По мнению авторов, исследование мозговых сетей в гиперболическом пространстве открывает новые перспективы в неврологии и психиатрии.

Рассмотрим возможность моделирования некоторых свойств нейронных сетей головного мозга в процессе становления ремиссии АЗ с помощью формализма двухслойных сетей (ДС) [3, 5, 11]. ДС – частный случай многослойных сетей, состоящих из двух сетей, узлы в которых могут быть репликами друг друга [11, 12]. Узлы внутри каждого слоя такой ДС могут взаимодействовать между собой. Так как для осуществления функций ЦНС часто требуются сложные механизмы межполушарного взаимодействия, то узлам модели могут соответствовать достаточно сложные структуры головного мозга.

Необходимо учитывать, что нейронные сети головного мозга в процессе становления ремиссии АЗ [4] относятся к временным – изменяющимся во времени сложным сетям. В работе [14] показано, что, при определенных условиях свойства равновесных и неравновесных – временных сетей можно считать эквивалентными. В частности, если вероятность связи между парой узлов идентична, не так важно, используются ли в модели статичные графы или графы динамичные, временные.

М.Ф. Тимофеевым были опубликованы результаты исследования больных мужчин с АЗ (с диагнозом хронического алкоголизма II стадии) с помощью реоэнцефалографической (РЭГ) методики изучения реакции сосудов лобной области головного мозга (определялся коэффициент межполушарной асимметрии, отражающий состояние активности нейронных сетей – К(ас) на запах алкоголя [6]. На каждой РЭГ записывали фоновую кривую и рассчитывали коэффициент межполушарной асимметрии К'(ас), который вычисляется по формуле: К'(ас) = (Аб – Ам/Ам)·100 %, где Аб – амплитуда реограммы на стороне, где реографический индекс больше, а Ам – амплитуда реограммы не стороне, где реографический индекс меньше. Показатели асимметрии кровоснабжения полушарий головного мозга во время проведения функциональной пробы с парами алкоголя (Кас – отношение К'(ас), определенного после проведения функциональной пробы к фоновому значению К'(ас)) отражают состояние активности нейронных сетей головного мозга человека. Периоды максимальной чувствительности к запаху этанола – нечетные (они же «периоды риска» рецидива алкоголизма), приходятся на исходный день (нулевой день воздержания от алкоголя) (I период), 2–3-й дни (III период), 7–8-й дни (V период), 19–21-й дни (VII период) и 45–50-й дни (IX период). К(ас) нечетных периодов соответственно: 253, 120, 95, 79 и 80 %. Периоды минимальной чувствительности к запаху алкоголя – четные, приходятся на 2-й день (II период), 4–5-й дни (IV период), 12–13-й дни (VI период), 30–32-й дни (VIII период) и 62–66-й дни (X период) ремиссии. К(ас) четных периодов соответственно: 95, 65, 50, 39 и 37 %. Обращает на себя внимание, что сроки смены (в днях) I–VII периодов становления ремиссии точно соответствуют ряду чисел Фибоначчи [1]:

1; 2; 3; 5; 8; 13; 21; 32; 50; 66

(сроки смены периодов становления ремиссии в сутках).

1; 2; 3; 5; 8; 13; 21; 34; 55; 89

(ряд Фибоначчи).

I; II; III; IV; V; VI; VII; VIII; IX; X (№ периода по М.Ф. Тимофееву). Важно, что ряду Фибоначчи соответствует кривая с гиперболическими свойствами (что соответствует гиперболичности «скрытой геометрии» в рассматриваемой модели) [2]. Причем, взаимодействие «узлов» кривых четных и нечетных периодов описывается формализмом двудольных сетей [3, 10]. Легко видеть, что в процессе купирования ААС (и нормализации психического и соматического состояния больных АЗ) Кас и нечетных и четных периодов по М.Ф. Тимофееву приближается к некоторому оптимуму ФА ГМ, с Кас, равным соответственно 79 и 80 % и 39 и 37 %. Вероятно, при этом уровне ФА ГМ наряду с другими функциями ЦНС приближается к оптимуму и уровень ВЖМ.

Концепция авторов [11, 12] о скрытых переменных ДС сетей основана на формализме, развитом ранее для «обычных» сложных сетей (в том числе для нейросетей головного мозга), причем узлы обоих типов сложной сети они рассматривают как находящиеся в скрытом метрическом пространстве. Каждый узел каждого типа в ДС сети имеет ряд скрытых переменных. Расстояние между двумя узлами в этом пространстве определяется вероятностью их связи (учитывая временную природу ДС нейросети ЭЗФС, возможно измерение этого расстояния в интервалах времени) [4].

Выводы. Предлагается новый подход к моделированию маршрутизации информации в нейронных сетях полушарий головного мозга на примере динамики ЭЗФС. Предполагается, что нейронные сети двух полушарий-слоев головного мозга обладают скрытой гиперболической геометрией, свойством геометрической корреляции. Оптимальному уровню геометрической корреляции узлов нейронных сетей правого и левого полушарий головного мозга в норме соответствует оптимальный уровень ФА ГМ. Именно поэтому они могут взаимодействовать по механизму «взаимной жадной маршрутизации» (ВЖД), что может обеспечивать преимущество «двухслойного» – двухполушарного мозга в передаче информации перед мозгом «однослойным». В процессе купирования ААС, становления ремиссии АЗ (и нормализации состояния ЦНС больных АЗ) оптимизируется и уровень ФА ГМ; вероятно, при этом приближается к оптимуму и уровень ВЖМ.

Литература

1. *Антропов Ю.А.* [*и др.*] Некоторые аспекты патологического (зависимого) влечения при алкоголизме // Вопросы наркологии. 2014. № 1. С. 121–132.

2. *Балакшин О.Б.* Коды да Винчи – новая роль в естествознании? Неожиданное о золотом сечении: гармония асимметричных подобий в Природе. М. : Комкнига, 2006. 176 с.

3. *Никонов Ю.В.* Структура и динамика этанолзависимой 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.

4. *Никонов Ю.В.* Функциональная межполушарная асимметрия головного мозга при алкогольной зависимости в контексте скрытой геометрии многослойных сетей // Проблемы нейронаук, функциональная асимметрия, нейропластичность и нейродегенерация : материалы Всероссийской конференции с международным участием. М., 2016. С. 189–192.

5. *Никонов Ю.В.* Моделирование взаимозависимости многослойных сетей головного мозга в контексте межполушарной асимметрии // Асимметрия. 2016. Т. 10, № 2. С. 14–22.

6. *Тимофеев М.Ф.* Периоды риска у больных алкоголизмом на ранних этапах ремиссии и противорецидивная иглотерапия // Вопр. наркологии. 1992. № 1. С. 35–38.

7. *Albert R.* [*et al.*] Topological implications of negative curvature for biological and social networks // Physical Review. 2014. V. E 89, iss. 3. P. 032811.

8. *Boccaletti S.* [*et al.*] Structure and Dynamics of Multilayer Networks // Physics Reports. 2014. V. 544. P. 1–122.

9. *Cacciola A.* [*et al.*] Coalescent embedding in the hyperbolic space unsupervisedly discloses the hidden geometry of the brain. 2017. arXiv: 1705.04192.

10. *Kitsak M., Krioukov D.* Hidden Variables in Bipartite Networks // Phys. Rev. E. 2011. V. 84. P. 026114.

11. *Kleineberg K., Boguna M., Serrano M.* Geometric correlations in real multiplex networks: multidimensional communities, trans-layer link prediction, and efficient navigation // Nature Phisics. AOP. 04.07.2016.

12. *Kleineberg K.* [*et al.*] Geometric correlations mitigate the extreme vulnerability of multiplex networks against targeted attacks. 2017. arXiv: 1702246.

13. *Krioukov D.* [*et al.*] Hyperbolic Geometry of Complex Networks // Phys. Rev. E. 2010. V. 82. P. 36106.

14. *Krioukov D., Ostilli M.* Duality between equilibrium and growing networks // Phys. Rev. E. 2013. V. 88. P. 022808.

15. *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.

16. *Papadopoulos F.* [*et al.*] Popularity versus Similarity in Growing Networks // Nature. 2012. V. 489. P. 537.

17. *Simas T.* [*et al.*] An algebraic topological method for multimodal brain networks comparison // Frontiers in Psychology. 2015. V. 6. P. 904.

18. *Travers J., Milgram S.* An experimental study of the small world problem // Sociometry. 1969. V. 32, № 4. P. 425–443.

Примеры расчетов динамических процессов при преобразовании сенсорных сигналов

И.В. Нуйдель, М.Е. Соколов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
nuidel@appl.sci-nnov.ru

В группе автоволновых процессов разработан экспериментальный образец программного обеспечения, предназначенный для использования специалистами научных институтов, фармакологических компаний, медицинских и учебных учреждений, которые проводят исследование передачи нервной активности в кортикальных структурах головного мозга; изучение коллективной динамики нейронных, астроцитарных и нейронглиальных сетей; выявляют фармакологическое действие медикаментов на активность СНГС в кортексе и т. д.

В разработанном ПО имеется удобный интерфейс задания параметров модели, сохранения и поиска результатов расчетов по тегам. При задании параметров выводится формульная запись системы уравнений.

В работе приведен пример преобразований сенсорных сигналов в модельных корковых структурах на одной из восьми вычислительных модельных программ в разработанном программном обеспечении.

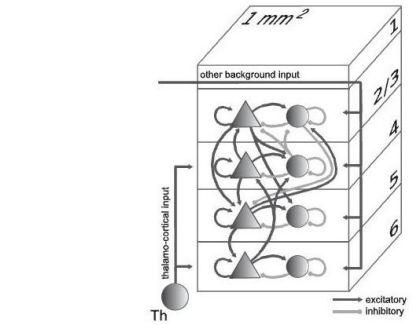
Популяционная модель микроскопического модуля коры

Для теоретического рассмотрения селективных свойств коры по отношению к различным стимулам использовалась теоретическая модель ее участков как двумерных плоских слоев, состоящих из большого количества нейроноподобных однотипных активных пороговых элементов, взаимодействующих между собой через возбуждающие и тормозные связи. Средние параметры популяции клеток, входящих в каждый активный элемент, описывают его состояние. Возможность использования такого модельного подхода опирается на известные экспериментальные данные: при диаметре микроколонки $d = 30\cdot10^{-6}$ м в нее входят до 80–100 нейронов, расположенных на пяти клеточных уровнях; при этом микроколонки объединены в макромодули (макроколонки) $D = (500-100)\cdot10^{-6}$ м, содержащие ~100 микроколонок.

В приближении однородности параметров рассматриваемых активных элементов такая модель одного слоя описывается приведенными ниже уравнениями на основе систем уравнений, исследуемых с середины 1980-х гг. [1, 2].

Воспользуемся данными, которые приведены для модуля из четырех слоев коры в макроколонке (рис. 1) [3].

В каждом слое в соответствии со схемой на рисунке учитывается влияние друг на друга популяции возбуждающих пирамидных клеток (система (1), переменная E), популяции тормозных (ингибиторных) интернейронов (переменная I) и глиальных клеток (переменная A) в слое и взаимное влияние слоев, схема которого составлена по данным измерений активности реальных клеток внутри слоев.



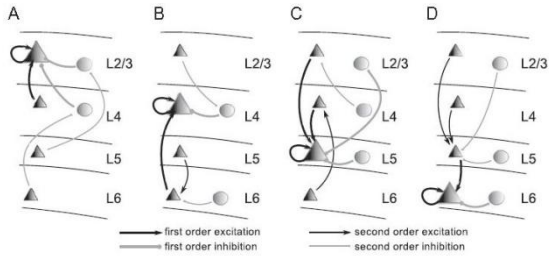


Рис. 1. Схема связей между слоями коры [3]: A – структура связей нервных клеток уровня 2/3, B – уровня 4, C – уровня 5, D – уровня 6; треугольники – пирамидные клетки. Черным цветом показаны возбуждающие связи, серым цветом – интернейроны соответствующих уровней коры и тормозные связи

Переменные $E(t)$, $I(t)$ имеют смысл относительного количества возбужденных волокон в малом объеме в момент времени t и пропорциональны количеству импульсов, распространяющихся по нервным путям клеток соответствующего слоя (активность возбуждающих и тормозных нейронов).

Активация клеток происходит внешним стимулом. Входной (внешний) сигнал $S_{ex}(\vec{r},t)$ (в общем случае многомерный) через нейроны специфического (релейного) ядра таламуса (на рис. 1 Th) по таламокортикальному пути поступает в шестой и четвертый слои коры. Например, двумерный зрительный сигнал проходит первичную обработку в зоне первичной зрительной коры. $\Phi(\vec{r})$ – функция пространственной связи между элементами слоя, вид которой определяет настройку данного нейронного слоя на операцию по выделению определенного признака исходного стимула.

На примере шестого слоя микроколонки коры приведено подробное объяснение переменных и

коэффициентов популяционной модели для одного активного элемента.

$$\frac{dE_6}{dt} = -\frac{E_6}{\tau_6} + k_6(A_6)\cdot F_6\left[-T_6 + k_{T6}E_T + \right.$$

$$\left. + k_{66}(A_6)\cdot E_6 \cdot \frac{Z_6}{\left|Z_6 + A_6(0)\cdot \frac{\tilde{\tau}_{E_6Z_{E_6}}}{\tilde{\tau}_{A_6Z_{E_6}}}\right|} - k_{I_6 6} I_6\right],$$

$$\frac{dI_6}{dt} = -\frac{I_6}{\tau_{I_6}} + k_{I_6}(A_6)\cdot F_{I_6}\left[-T_{I_6} - k_{I_6I_6}I_6 + k_{6I_6}E_6\right], \quad (1)$$

$$\frac{dA_6}{dt} = -\frac{A_6}{\tau_{A_6}} + k_{A_6}\cdot F_{A_6}\left[-T_{A_6} + k_{6A_6}E_6 - k_{I_6A_6}I_6\right],$$

$$\frac{dZ_6}{dt} = -\frac{Z_6}{\tilde{\tau}_{Z_{E_6}}} - \frac{E_6}{\tilde{\tau}_{E_6Z_{E_6}}} + \frac{A_6}{\tilde{\tau}_{A_6Z_{E_6}}}.$$

E_6, I_6, A_6 – активность пирамид (возбуждающих нейронов), интернейронов (тормозных нейронов) и глиальных клеток шестого слоя коры.

E_T – внешний сигнал с таламуса.

Z_6 – энергетическая функция, характеризующая содержание АТФ в нейронах слоя. Состояние глиальных клеток определяет содержание АТФ в соответствующих клетках. Энергетический запас уменьшается в процессе роста активности нейронов и увеличивается благодаря влиянию глии (например, способность астроцитов выделять молекулы глиотрансмиттеров во внеклеточное пространство, влияющих на нейрональную активность, была обнаружена около двух десятилетий назад, поэтому было сделано предположение, что астроцитарные клетки участвуют в нейрональных сетевых процессах [4]).

$\tau_6, \tau_{I_6}, \tau_{A_6}$ – характерные времена затухания начального возмущения пирамид, интернейронов, глиальных клеток шестого слоя коры при $F_i = 0$.

$k_6(A_6), k_{I_6}(A_6)$ – плотность активируемых пирамид и интернейронов; зависит от активности глиальных клеток в слое.

k_{A_6} – плотность глиальных клеток в слое.

F_6, F_{I_6}, F_{A_6} – нелинейная пороговая функция типа конечного скачка, например сигмоидальная функция (аналог постсинаптического потенциала на соответствующих клетках).

T_6, T_{I_6}, T_{A_6} – пороги активации пирамид, интернейронов и глиальных клеток.

k_{T6} – плотность расположения возбуждающих синапсов таламуса на возбуждающих нейронах шестого слоя пирамид.

k_{66} – плотность расположения синапсов пирамид шестого слоя на пирамидах этого же слоя.

$k_{I_6 6}$ – плотность расположения синапсов интернейронов шестого слоя на пирамидах этого же слоя.

$k_{I_6I_6}, k_{6I_6}$ – плотность расположения синапсов интернейронов и пирамид шестого слоя на интернейронах этого же слоя.

Результаты расчетов на точечной модели одного слоя в разработанном ПО

Точечная модель (1) описывает состояние шестого слоя микроколонки коры. Ниже (рис. 2) рассмотрены режимы в системе при изменении параметров T_6 – порог активации пирамид (возбуждающих нейронов) – и $k_{I_6 6}$ – плотность расположения синапсов интернейронов шестого слоя на пирамидах этого же слоя (влияние тормозных клеток на возбуждающие). Система переходит от ждущего режима к автоколебательному с разной частотой автоколебаний в зависимости от параметров к триггерному – при малом пороге.

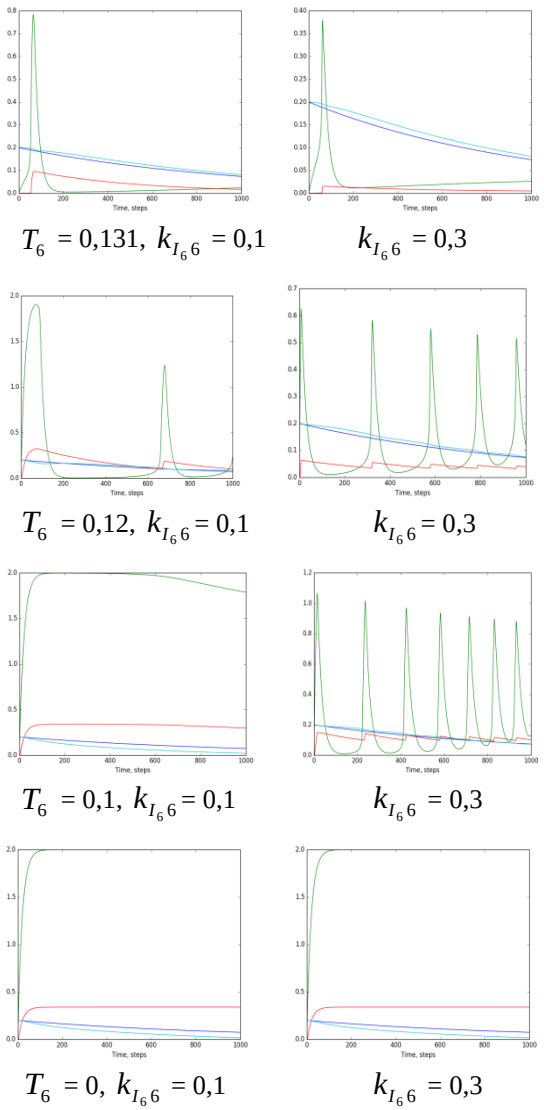


Рис. 2. Результаты расчетов с помощью разработанного ПО. Начальные условия модели: $A_6(0) = 0{,}2$; $Z_6(0) = 0{,}2$; $E_T = 0{,}25$

В ждущем режиме одиночный короткий импульс – активность пирамид коры, одиночный длинный импульс – активность тормозных интернейронов коры.

Частота автоколебаний увеличивается с уменьшением порога и усилением влияния тормозных интернейронов на активность пирамид.

Зеленым цветом на графиках обозначена активность пирамид, красным – активность тормозных интернейронов, синим – активность глиальных клеток, серым – энергетическая переменная. По оси *x* – время в шагах.

Заключение

Разработанная версия интегральной математической модели обработки сигналов в нейронах и глиальных клетках и экспериментальный образец программного обеспечения позволяют проводить широкий спектр исследовательских работ по моделированию передачи нервной активности в сверхбольших нейрон-глиальных сетях кортикальных структур головного мозга.

Исследования динамических режимов генерации и распространения сигналов ориентированы на понимание фундаментальных принципов обработки информации в нейронных и нейрон-глиальных системах мозга.

Проведены расчеты динамических режимов преобразования внешних сигналов в нескольких редуцированных моделях, при этом приведены лишь тестовые примеры из потенциально возможного набора режимов.

Разработанное программное обеспечение дает возможность составлять каталог режимов функционирования нейрон-глиальных ансамблей, а также давать описание и интерпретации для изучаемой системы в биофизических или нейрофизиологических терминах.

Литература

1. *Кудряшов А.В., Яхно В.Г.* Распространение областей повышенной импульсной активности в нейронной сети // Динамика биологических систем. 1978. Вып. 2. С. 45–59.

2. *Яхно В.Г.* Модели нейроноподобных систем. Динамические режимы преобразования информации // Нелинейные волны – 2002 / отв. ред. А.В. Гапонов-Грехов, В.И. Некоркин. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2003. С. 90–114.

3. *Tobias C.* Potjans and Markus Diesmann the Cell-Type Specific Cortical Microcircuit: Relating Structure and Activity in a Full-Scale Spiking Network Model // Cerebral Cortex. 2014. V. 24. P. 785–806; doi:10.1093/cercor/bhs358.

4. *Hassinger T.D., Guthrie P.B., Atkinson P.B., Bennett M.V., Kater S.B.* An extracellular signaling component in propagation of astrocytic calcium waves // Proc. Natl Acad. Sci. USA 1996. V. 93. P. 13 268–13 273 ; doi:10.1073/pnas.93.23.13268.

Становление электродинамики как модельный эволюционный эксперимент

В.М. Ольшанский

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва
vmolsh@yandex.ru

Два подхода

Когнитивная конференция побуждает говорить о самом интересном из процессов – динамике коллективного разума. А поскольку организатором конференции является ИПФ РАН, то в качестве конкретного примера коллективной когнитивной деятельности имеет смысл выбрать становление электродинамики.

Под словом «разум» мы можем понимать либо развитие некой платонической идеи, оторванной от нашего животного начала и созвучной Божественному Замыслу и законам мироздания, либо, напротив, продукт биологической эволюции от примитивных форм к человеку. Соответственно с этими двумя пониманиями разума мы можем сопоставить два взгляда на развитие электродинамики.

Широко известная попытка описания первого типа была сделана Эйнштейном и Инфельдом в книге «Эволюция физики» с подзаголовком «Развитие идей от первоначальных понятий до теории относительности и квантов» [1].

Авторы указывают, что их стремление состояло в том, «чтобы широкими штрихами обрисовать попытки человеческого разума найти связь между миром идей и миром явлений» [1. С. 5]. Физики читают «великую повесть о тайнах природы» [1. С. 7].

Проблема в том, что эта повесть написана высшим разумом на особом сакральном языке во времена возникновения Вселенной. В повести много незнакомых слов, смысл которых постепенно проясняется, как в «великолепных рассказах Конан-Дойля» [1. С. 8]. Часто новые факты и их трактовки требуют кардинального переосмысления самых важных слов и повесть приходится читать сначала. Задача физика – это задача переводчика с сакрального на бытовой. Адекватность перевода проверяется путем сравнения с физическим экспериментом. Чем точнее перевод Книги Замысла, тем точнее мы можем предсказать различные виды движений в реальном мире.

Поскольку Книга имеет сюжет, то важно уметь отличать существенные детали от случайных. Авторы пытаются выделить «столбовой путь» [1. С. 5], решительно отсекая все боковые ответвления. На этом пути Кулон, Эрстед, Фарадей, Максвелл и Герц – лишь промежуточные вехи от механистических взглядов Ньютона к совершенному релятивизму Эйнштейна. Кавендиш, Ампер, Ом, Кирхгофф, Вебер, Генри, Тесла даже не упомянуты. Открытия Гальвани и изобретение Вольты описаны одним абзацем, который будет приведен в этом тексте позже.

При рассмотрении второго типа, базирующемся на теории эволюции, все обстоит совсем иначе. Никакого исходного мира идей и сакральной Книги не было. И идеи, и Книга, и словарь формировались и формируются путем многочисленных последовательных слабых модификаций в реальном мире вместе с морфологическими структурами, физиологическими механизмами, формами поведения. «Самые сложные органы и инстинкты могли быть усовершенствованы не при помощи средств, превосходящих человеческий разум, хотя и аналогичных ему, а путем кумуляции бесчисленных незначительных вариаций, каждая из которых была полезна для ее обладателей» [2, С. 253].

Если цель физиков, по Эйнштейну, – предсказание движений различных объектов, то цель эволюционных биологов – восстановление натуральной истории различных субъектов. Эту цель можно проиллюстрировать известной цитатой из «Происхождения видов…»: «Когда мы перестанем смотреть на органическое существо, как дикарь смотрит на корабль, т. е. как на нечто превышающее его понимание; когда в каждом произведении природы мы будем видеть нечто, имеющее длинную историю; когда в каждом сложном строении или инстинкте мы будем видеть итог многочисленных приспособлений, каждое из которых полезно их обладателю, подобно тому как всякое великое механическое изобретение есть итог труда, опытности, разума и даже ошибок многочисленных тружеников; когда мы выработаем такое воззрение на органические существа, как неизмеримо – говорю на основании личного опыта – возрастает интерес, который представит нам изучение естественной истории!» [2. С. 268]

Обратим внимание на аналогию между приспособлениями организмов или формированием инстинктов в природе и изобретениями в технике. Эта аналогия подчеркивается Дарвиным неоднократно. Она дает нам основания применять методологию эволюционной теории и биологические метафоры к анализу динамики проявлений человеческого разума, например, к становлению электродинамики.

Начало электродинамики

В процессе эволюции разные организмы научились генерировать, воспринимать и использовать низкочастотные электрические токи и электромагнитные колебания оптического диапазона. Эти два частотных диапазона соответствовали окнам прозрачности для распространения элек-

тромагнитного поля в первоначальной среде – Мировом океане. Наличие природного зрения у человека во многом определило особый язык описания оптических явлений и выделение оптики как отдельной физической дисциплины и геометрии как отдельного вида математики. А вот возможность непосредственного восприятия распределения и динамки электрических токов как особую сенсорную модальность мы в процессе эволюции утратили.

Как смотрится становление электродинамики в свете эволюционной теории? Мы можем исходить из концепции расширенного фенотипа, когда отбор закрепляет не только морфологические структуры, являющиеся частями организма, но и формы поведения, обеспечивающие пользу за счет модификации внешнего мира. Строительство пчелиных сот, птичьих гнезд и бобровых плотин, формирование раковин моллюсков и паутины пауков – все это проявления расширенных фенотипов.

Важнейшим событием в становлении электродинамики стало изобретение той начальной искусственной структуры, которая послужила зародышем электротехники и от которой пошли дальнейшие адаптации к использованию электричества. Это вольтов столб. Приведем ранее обещанную цитату из книги Эйнштейна и Инфельда:

«Особенно быстрое развитие электричества как ветви науки и техники началось с открытия электрического тока. Здесь мы находим в истории науки один из очень немногих примеров, в которых случай сыграл существенную роль. История конвульсий лягушачьей лапки рассказана во многих вариантах. Не ручаясь за достоверность в отношении деталей, можно без сомнения сказать, что случайное открытие Гальвани привело Вольта в конце 18 столетия к построению прибора, известного под названием вольтовой батареи. Теперь она практически не употребляется, но на нее еще указывают как на очень простой пример источника тока в школьных демонстрациях и в учебниках» [1. С. 72].

Подчеркивать случайность открытия Гальвани можно, только если смотреть на него издали, со «столбовой дороги» теоретической физики и «не ручаясь за достоверность в отношении деталей».

Первоначальный феномен был замечен женой Гальвани Лючией Галеаци. Случайность состояла в том, что наблюдая за работой мужа и его ассистента Лючия крутила ручку находившейся в лаборатории электрофорной машины. Наблюдательная молодая женщина заметила занятный эффект – лапка лягушки, препарируемой ассистентом Гальвани, сокращалась тогда, когда проскакивали искры в электрофорной машине. Но это случайность того же рода, что и эксперимент Эрстеда, привлекший внимание Ампера. Дальнейшие опыты Ампера и выведение из них первых электродинамических законов – это уже не случай, а научное исследование.

Также и для Гальвани начальный феномен послужил лишь отправной точкой. Многочисленными модификациями экспериментов Гальвани добился наиболее устойчивой физиологической реакции и превратил лягушачью лапку с обнаженным нервом в физический прибор, на порядки более чувствительный, чем электрометры XVIII века. Экспериментальным путем Гальвани установил, что эффективность источника и приемника могут быть повышены при присоединении к шарам электрофорной машины, к мышце и нерву отрезков металлического провода, образующих дипольные антенны. Задолго до Герца он провел эксперименты по электромагнитной связи и показал, что электрическое воздействие передается через стены комнат и вакуум воздушного колокола. Гальвани показал, что сокращение мышцы может быть вызвано без внешних источников путем замыкания мышцы и нерва дугой из проводника. Более того, он обнаружил и наглядно показал, что если дуга составлена не из одного цельного проводника, а из двух разных металлов, то эффект гораздо заметнее. Различия в величине эффекта связаны с типами металлов, составляющих гальванические пары. И самое главное – Гальвани убедительнейшим образом показал, что всему живому, каждой мышце, каждому нерву, каждому органу чувств самых разных животных свойственно электричество [3]. Это полностью соответствовало последнему абзацу «Математических начал натуральной философии» Исаака Ньютона «о некотором тончайшем эфире … коего силой и действиями … возбуждается всякое чувствование, заставляющее члены животных двигаться по желанию, передаваясь именно колебаниям этого эфира от внешних органов чувств мозгу и от мозга мускулам» [4. С. 662].

Открытия Гальвани произвели огромное впечатление на множество людей, вовлекая их в эксперименты с электричеством. Казалось бы, потенциальная польза этих исследований была очевидна – раскрытие тайны жизненных сил и формирование новой медицины. Но заметных побед в этом направлении не случилось. Более того, Алессандро Вольта после многочисленных повторений экспериментов Гальвани открыл контактную разность потенциалов и объяснил ею наблюдаемые эффекты, отказавшись от гипотезы животного электричества. Подчеркнем, что само различие воздействия дуги из разных металлов от дуги из одного и того же металла было обнаружено и описано Гальвани.

За открытие контактной разности потенциалов и объяснение экспериментов Гальвани Вольта в 1794 году был удостоен медали Копли. Но помимо контактной разности потенциалов для создания вольтова столба нужна была еще одна идея, обеспечивавшая суммацию напряжений – влажные прокладки между металлическими дисками. Путь к этой идее потребовал еще 6 лет интенсивной работы. Только в 1801 году Вольта сообщает о своем изобретении со ссылкой на биологическую метафору: «Этот прибор, более сходный по существу, как я покажу дальше, с естественным электрическим органом электрического ската или

электрического угря и т. п., чем с лейденской банкой и известными электрическими батареями, я назову искусственным электрическим органом» [5]. Хотя аналогия с электрическими органами угрей и скатов, позднее много раз описанная Вольтой, выглядит как очевидный источник его изобретения, оно имело и иные более прямые основания – эксперименты Джона Уолша с электрическими скатами [6], удостоенные медали Копли в 1773 году и эксперименты Генри Кавендиша с моделями электрических скатов, результаты которых были опубликованы в Трудах королевского общества в 1776 году [7]. Вольта был знаком с Уолшем и хорошо знал эти результаты. Таким образом, предыстория вольтова столба занимает минимум четверть века.

Но это еще не все. Контактная теория Вольты не слишком убедительно объясняла не только эксперименты Гальвани, но и принцип действия вольтова столба. Это не помешало современникам сразу оценить изобретение Вольты как величайшее.

С точки зрения эволюционной теории центральным вопросом всегда является вопрос: «Зачем?» Какая польза была от вольтова столба в первые годы после его изобретения, тем более что сам Вольта к этому времени активно отрицал перспективы электромедицины?

Ответ состоит в том, что вольтов столб широко вошел в научную практику как принципиально новый инструмент постановки разнообразных опытов. С помощью вольтова столба устанавливались связи электричества с тепловыми, оптическими, химическими, физиологическими, магнитными и механическими явлениями. Во всех естественных науках вольтов столб обеспечивал бурный прогресс.

Вольтов столб был впервые продемонстрирован в 1801 году, и только в 1840 году Майкл Фарадей публикует статью «Об источнике мощности гальванического элемента» [8. С. 32–151], объясняющую принцип действия вольтова столба и ставящую точку в споре сторонников контактной теории и сторонников химической силы в пользу последних.

Этой статье непосредственно предшествовали эксперименты Фарадея с электрическим угрем [8. С. 11–31]. При постановке и обсуждении результатов экспериментов с угрем Фарадей откровенно интересуется взаимоотношениями электричества и жизненных сил и возможностью их взаимных превращений. Эти обсуждения предопределили смену парадигм в физике – от объяснения явлений с позиций механических сил к объяснениям с позиций «живых сил», позднее переименованных в энергии.

К сожалению, формат тезисов не позволяет ни обсудить этот начальный период электродинамики более подробно, ни сопоставить его с эволюционной историей электрических рыб.

Дальнейшие перспективы

Представляется, однако, важным обсудить перспективы электродинамики с позиций эволюционной теории и исходя из концепции расширенного фенотипа. Описанное Эйнштейном решительное обрезание боковых ответвлений позволило физикам в первой половине XX века сосредоточить большую часть материальных и интеллектуальных ресурсов в направлении, приведшем к созданию теории относительности и атомной бомбы. Эта «польза» долго служила оправданием расходов на электродинамику, тем более что у нее были и другие заметные достижения, например в области локации, навигации и связи. Релятивистские эффекты, описанные Эйнштейном, – это не только про гипотетические межгалактические звездолеты и атомную бомбу. Они окружают нас в быту в любых электромагнитных явлениях.

Аналогично эволюционная теория – это не только про динозавров. Это про постоянно идущие вокруг нас многочисленные развилки, проходя которые, многочисленные виды живых существ делают свой осознанный или неосознанный выбор. Таким образом осуществляются слабые модификации и естественный отбор.

Если искать новые пользы от какой-либо структуры, например от организации, занимающейся электродинамикой, то надо искать для нее новые функции и новые объекты приложения. Если отращивать новые побеги от корня, от «отца электричества» Майкла Фарадея, то имеет смысл принять во внимание его восторженный интерес к электричеству в живом и его готовность обсуждать главные вопросы – вопросы типа «зачем?». Продвигаясь в этом направлении, электродинамика получит возможность работать не только с объектами, но и с субъектами. Субъект отличается от объекта наличием поведения, способностью различать слова и адекватно на них реагировать, способностью эволюционировать.

Собственно именно в эту сторону эволюционирует электродинамика в последние десятилетия – от электротехники к электронике, от электроники – к цифровой технике.

Человечество научилось создавать искусственные объекты, демонстрирующие свойства, ранее присущие только живым объектам. Но этим устройствам не свойственно самостоятельное целеполагание. С позиций расширенного фенотипа цифровая техника – это не создание искусственных особей, а выработка человечеством способности делегировать свою субъектность, расширение способности манипулировать окружающим миром.

Сегодня «столбовая дорога прогресса» ассоциируется с прогрессом цифровых технологий. Этот прогресс, конечно, опирается на физические начала, но было бы нелепо настаивать, что это прямое продолжение пути, указанного Эйнштейном. Самоизоляция физики от биологии, от разработки методологии целеполагания привела к утрате лидерства. Иные навыки представителей Homo sapiens, вовлеченных в креативную деятельность, приводят сегодня к успеху и признанию.

О религиозности в науке

Последняя тема, которую хотелось бы затронуть, – связь представлений о мире с религиозны-

ми и антирелигиозными догматами. Те два взгляда, которые сопоставляются с самого начал текста, – это взгляд со стороны высшего разума и со стороны эволюционной теории. Насколько они принципиально различны? Насколько отличаются, например, взгляды Ньютона, позиционирующего себя как человека религиозного, и взгляды Дарвина, открыто признававшего свой атеизм?

Отход от честного, открытого обсуждения связи базовых теорий с религиозными взглядами их авторов вредит пониманию смысла оригинальных текстов и способствует оттеснению науки на край общественного интереса.

В российской системе обучения физике как в школе, так и в вузах сложилась странная традиция избегать непосредственного чтения «Математических начал натуральной философии» и соответственно ничего не говорить о главной из трех составляющих трактат Ньютона книг – «О системе мира». Скорее всего, это было связано именно с тем, что она посвящена отношениям физики и Бога. Между тем рассуждения Ньютона о Боге, приведенные в Началах, содержат много интересных высказываний. Например, такое: «Бог *не* испытывает воздействия от движущихся тел, движущиеся тела *не* испытывают сопротивления от вездесущия Божия» [7. С. 660–661]. Редкий атеист настолько полно ограничивает Бога в праве творить чудеса. Такая фраза никак не соответствует догмату о Троице. Нужна была большая откровенность, чтобы профессор Тринити-колледжа включил ее в официально издаваемый текст. И вместе с тем: «Он установил пространство и продолжительность» [7. С. 660] и «Вот что можно сказать о Боге, рассуждение о котором, на основании совершающихся явлений, *конечно, относится* к предмету натуральной философии» [7. С. 661].

Ситуация с чтением Дарвина в нашей стране гораздо лучше, чем с чтением Ньютона. Большинство профессиональных биологов и читали его тексты во время обучения, и неоднократно возвращались к ним позже. Ссылки на Дарвина и споры об убедительности эволюционной теории сегодня почти столь же эмоциональны, как и в XIX веке. Известные популяризаторы эволюционной теории и откровенные атеисты Ричард Докинз и Шон Кэрролл именем Дарвина клеймят приверженцев религиозных взглядов. Но давайте внимательно перечитаем предложение, которым заканчивается «Происхождение видов путем естественного отбора»:

«Есть величие в этом воззрении, по которому жизнь с ее различными проявлениями Творец первоначально вдохнул в одну или ограниченное число форм; и между тем как наша планета продолжает вращаться согласно неизменным законам тяготения, из такого простого начала развилось и продолжает развиваться бесконечное число самых прекрасных и самых изумительных форм» [2. С. 270].

Тема религиозности ученых и учений слишком остра для обсуждения в печатных научных текстах, где неаккуратно сформулированная мысль легко может вызвать неверное восприятие и эмоциональную реакцию читателя. Но при живом общении на конференции откровенный разговор такого рода представляется важным и нужным.

Литература

1. *Эйнштейн А., Инфельд Л.* Эволюция физики. М. : Наука, 1965. 326 с.

2. *Дарвин Ч.* Сочинения. Т. 3. М. : Изд-во АН СССР, 1939. 270 с.

3. *Гальвани А., Вольта А.* Избранные работы о животном электричестве. М. ; Л. : ОГИЗ, 1937. С. 112.

4. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии. М. : Наука, 1989. 688 с.

5. *Вольта А.* Об электричестве, возбуждаемом простым соприкосновением различных проводящих веществ : письмо к сэру И. Банксу от 20 марта 1800 г. // *Радовский М.И.* Гальвани и Вольта. М. ; Л. : ГЭИ,1941. С. 73–74.

6. *Walsh J.* Of the Electric Property of the Torpedo. In a Letter from John Walsh, Esq; F. R. S. to Benjamin Franklin, Esq; LL.D., F. R. S., Ac. R. Par. Soc. Ext. // Philos. Trans. 1773/1774. V. 63. P. 461–480.

7. *Cavendish H.* An account of some attempts to imitate the effects of the Torpedo by electricity // Philos. Trans. Roy. Soc. 1776. V. 66. P. 196–225.

8. *Фарадей М.* Экспериментальные исследования по электричеству. Т. 2. Изд-во АН СССР, 1951. 539 с.

Исследование дельта-, тета- и альфа-вызванной ритмической активности мозга человека в условиях сенсорной маскировки

М.А. Павловская, Е.К. Айдаркин

Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского ЮФУ, Ростов-на-Дону

Известно, что исследования мозговой активности имеют основополагающее значение для изучения нейро- и психофизиологических механизмов когнитивного альянса: восприятия, внимания, памяти и обучения. 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 познавательных задач, влияя на поведение.

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 кросс-модальной 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 68 студентов ЮФУ без патологий сенсорных систем. Были использованы процедуры прямой (маскер предшествует целевому стимулу) и обратной (целевой стимул предшествует маскеру) маскировок одной или разных модальностей. В ответ на целевые стимулы по инструкции необходимо 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 осуществляются с помощью компьютерного энцефалографа-анализатора «Энцефалан-131-03» (Таганрог, Россия). Частотные интервалы адаптивной фильтрации для получения ритмических колебаний, соответствующих основным компонентам ССП, составляют 0,5–3 Гц для дельта, 4–7 Гц – тета, 8–13 Гц – альфа и 14–24 Гц – бета-диапазона. Оцифрованная ЭЭГ экспортируется в среду MATLAB, где проводится 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.

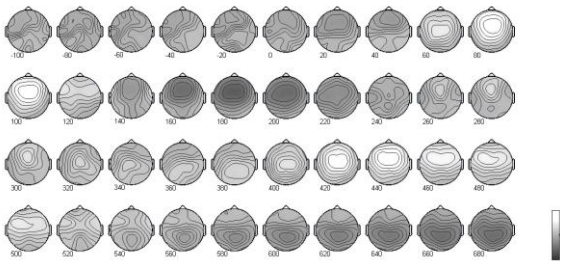


Рис. 1. Изопотенциальная карта компонентов ССП в условиях обратной слуховой маскировки (белым цветом показана негативность, черным – позитивность)

Стадия обнаружения стимула представлена негативностью во фронтальной области для слухового анализа и в париетальной – для зрительного. Различение стимулов сопровождается развитием двух негативных фокусов: в верхне-височных для слухового и нижне-затылочных областях для зрительного стимула. Оба фокуса находятся в местах пересечения дорзальных и вентральных вторичных сенсорных путей. Далее развивалась позитивная волна в лобной и теменной областях в сагиттальных отведениях, обеспечивающих деактивацию двух систем внимания.

Завершение сенсомоторной интеграции соответствует одновременному формированию позитивных фокусов в лобной (*P*3*а*) и теменной (*P*3*б*) областях, расположенных сагиттально. Лобный фокус, преобладающий в условиях зрительной стимуляции в тета-диапазоне, вероятно, притормаживал процессы, связанные с произвольным контролем со стороны таламо-фронтальной системы. Теменной фокус, выраженный лучше при слуховом восприятии, развивался в дельта-диапазоне (1–2 Гц), что, скорее всего, соответствовало процессам деактивации таламо-париетальной системы. Далее было изучено взаимодействие фронтальной системы, проявляющейся в активации симметричных процессов негативно-позитивных тета-колебаний (*N*1, *P*2, *N*2, *P*3*а*) ССП, и париетальной, отражающейся в процессах развития дельта-колебаний (*CNV*, *MMN*, *P*3*б*) ССП. В условиях обратной маскировки маскер воздействовал на тета-колебания ССП, снижая эффективность деятельности. В условиях прямой маскировки маскер воздействовал на дельта-компонент ССП, оптимизируя сенсомоторную интеграцию.

Метод построения изопотенциальных карт основных компонентов позволил изучить локализацию фокусов максимальной активности стадий ожидания целевого стимула или игнорирования маскера, а также принятия решения и выполнения двигательного ответа на целевой стимул.

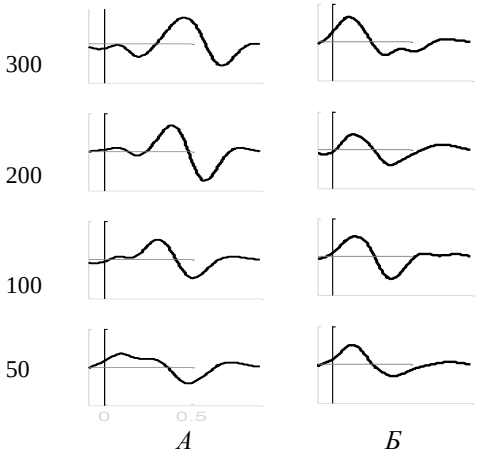


Рис. 2. Вызванная дельта-активность в условиях прямой (*А*) и обратной (*Б*) слуховой маскировки в отведении *Cz* при сокращении межмаскировочных интервалов (указаны слева)

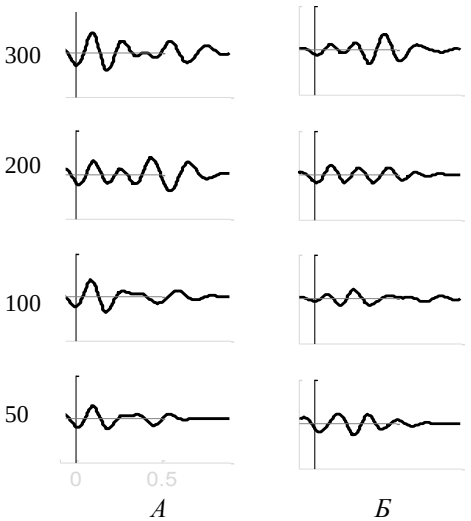


Рис. 3. Вызванная тета-активность в условиях прямой (*А*) и обратной (*Б*) слуховой маскировки в отведении *Cz* при сокращении межмаскировочных интервалов (указаны слева)

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 маскирующе-

го стимулов. Так, дифференцировка целевых стимулов связана с повышением дельта-ритма (рис. 2) и снижением тета-ритма (рис. 3) ССП, охватывающего волну ожидания, компоненты негативности рассогласования и *Р*3*б*, 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.

Дельта-ритмический диапазон ССП высоко коррелирует с 2 Гц вызванным ритмом, тета – с 5 Гц, альфа-фронтальный – с 7–8 Гц, альфа-париетально-окципитальный – с 9–10 Гц.

Предполагается, что увеличение дельта-колебаний ССП связано с привлечением внимания к целевому стимулу, а тета – с игнорированием маскировочного стимула.

Флуктуация авторитмичности альфа-ритма ССП (лобный и теменно-затылочный фокусы) зависит от модальности, порядка следования и значимости стимула, которая модулирует или организует межмодальную сенсомоторную интеграцию посредством направления внимания на воспринимаемый стимул.

Таким образом, использование процедуры маскировки позволяет изучить взаимодействие таламо-фронтальной и таламо-париетальной систем внимания. Таламо-фронтальная система контролирует формирование *N*1, *P*2, *N*2 и *P*3*а* компонентов ССП в диапазоне тета-колебаний, а таламо-париетальная – волну ожидания, негативность рассогласования и компонент *Р*3*б* в дельта-ритме. 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, iss. 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.* Sensory neural 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.

Вегетативные проявления острого стресса при экспериментальном моделировании процесса синхронного перевода

С.Б. Парин[1,2], С.А. Полевая[2,1], Т.В. Черниговская[3], И.С. Парина[4], А.А. Конина[3], М.А. Кнабенгоф[3]

[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2]ЦНИЛ Нижегородской медицинской академии
[3] Санкт-Петербургский государственный университет
[4]Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова
parins@mail.ru

В работе исследовались особенности автономного обеспечения одного из самых напряженных и стрессогенных видов когнитивной деятельности человека – синхронного перевода (СП). Очевидно, что переводчик-синхронист должен: а) свободно владеть двумя, как минимум, языками, б) обладать умением адаптироваться к темпу переводимой речи, в) быстро переключаться между кодами различных языков и обеспечивать оптимальное взаимодействие нескольких информационных образов, то есть отображений событий и объектов в пространстве признаков [1].

Материал и методы

В экспериментах приняли участие 16 профессиональных переводчиков-синхронистов (13 женщин и 3 мужчин, возраст от 21 до 28 лет). Для объективной оценки динамики автономных функций была использована новая технология [2] событийно-связанной телеметрии сердечного ритма (рис. 1).

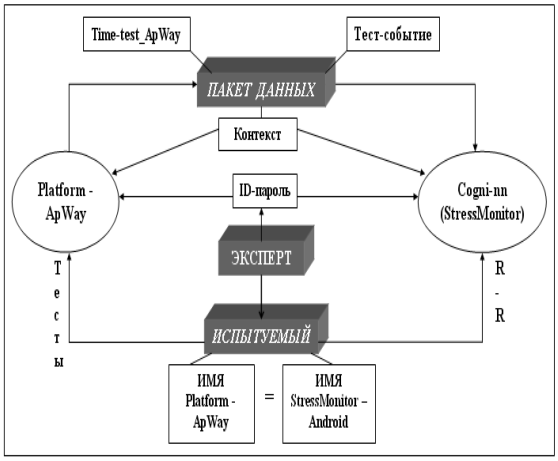


Рис. 1. Принципиальная схема программно-аппаратного комплекса для событийно-связанной телеметрии (ССТ) ритма сердца

Возможные физиологические механизмы решения когнитивных задач повышенной сложности и стрессогенности анализировались через сопоставление процессов взаимодействия информационных образов при СП и решении билингвального теста Струпа – лабораторной модели конфликта информационных образов различной природы. Дизайн базовых экспериментов был сформирован таким образом, чтобы максимально приблизить обстановку во время измерений кардиоинтервалов к контексту реальной работы синхронного переводчика. Переводчики, последовательно сменяя друг друга, выполняли профессиональные задания: эхо-повтор текста на родном языке, синхронный перевод текста с родного на иностранный, эхо-повтор текста на иностранном языке, синхронный перевод текста с иностранного на родной. Родные языки: русский (n = 15), немецкий (n = 1); иностранные языки: немецкий (n = 11), английский (n = 4), русский (n = 1). Кроме того, до и после профессиональной деятельности переводчики проходили билингвальный тест Струпа. Для статистического анализа применялись ANOVA (метод повторных измерений) и корреляционный анализ.

Результаты и обсуждение

В результате мониторинга вариабельности RR-интервалов полностью подтвердилось предположение о высокой стрессогенности синхронного перевода. Это проявлялось и в характерном уменьшении нативных RR-интервалов, и в соответствующих изменениях параметров вегетативной регуляции: падении общей мощности спектра вариабельности сердечного ритма (TP) на фоне резкого возрастания уровня доминирования симпатической активности над парасимпатической (LF/HF). Эти изменения полностью соответствовали характерной для острого стресса динамике вариабельности сердечного ритма, выявленной ранее [3] в различных лабораторных и естественных стрессогенных контекстах (рис. 2). Суммарная продолжительность стресс-эпизодов при эхо-повторе на родном языке составила 25 % от общей продолжительности задания, при эхо-повторе на иностранном языке – 50 %, при синхронном переводе с родного языка на иностранный – почти 69 %, а с иностранного на родной – 87,5 % (рис. 3). Сюрпризом стал результат анализа динамики изменений RR-интервалов в зависимости от рода заданий: напряжение при синхронном переводе было статистически значимо выше (p < 0,05) по сравнению с эхо-повтором только в первые 100 секунд выполнения задания, а затем различия становились недостоверными (рис. 4).

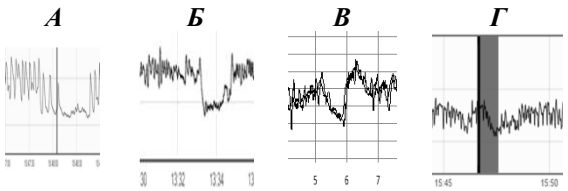


Рис. 2. Типичные примеры динамики вариабельности ритма сердца в стрессогенных контекстах: *А* – водитель автобуса при внезапном маневре на трассе; *Б* – докладчик в момент начала доклада; *В* – испытуемый при электроболевом стрессе; *Г* – переводчик в момент начала синхронного перевода с родного языка

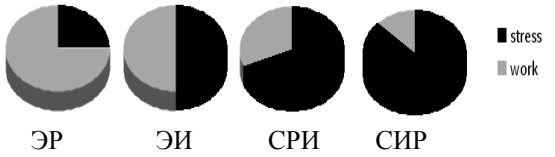


Рис. 3. Соотношение времени нормального функционального состояния (серый сектор) и периодов стресса (черный сектор) при выполнении синхронистами (n = 16) профессиональных заданий (n = 64). ЭР – эхо-повтор текста на родном языке, ЭИ – эхо-повтор иностранного текста, СРИ – синхронный перевод с родного языка на иностранный, СИР – синхронный перевод с иностранного языка на родной

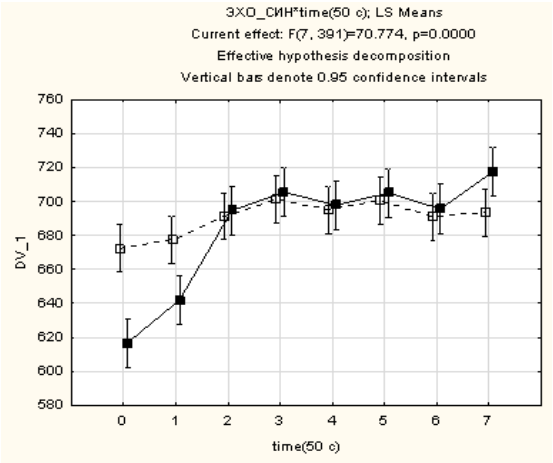


Рис. 4. Изменения RR-интервалов в процессе выполнения эхо-повтора (пунктир) и при синхронном переводе (сплошные линии), независимо от языка. По оси X – время (1 у. е. = 50 с); по оси Y – средний RR-интервал в мс; n = 16

Наибольший интерес представляло влияние степени сложности задач взаимодействия информационных образов на уровень затрат энергии в процессе синхронного перевода. Удовлетворительной экспериментальной моделью для решения этой задачи является компьютеризированный билингвальный тест Струпа. Он позволяет воспроизводить как взаимную активацию образов благодаря консолидации, так и их взаимное подавление благодаря конкуренции. При персонифицированном анализе соотношения ритма сердца и времени реакции при разных вариантах взаимодействия информационных образов (консолидация – конкуренция) в билингвальном тесте Струпа выявлено статистически значимое (p < 0,05) учащение ритма при увеличении времени реакции испытуемых, что подтвердилось корреляционным анализом. Была выявлена обратная корреляция между временем реакции и средним RR-интервалом при идентичности (цвет = смысл) и рассогласовании (цвет ≠ смысл) вербального и цветового образов (рис. 5). Наименьших затрат времени и наименьшего напряжения регуляторных систем требовали те задачи, в которых выбор цветового образца осуществлялся при идентичности смысла и цвета вербального стимула (консолидация).

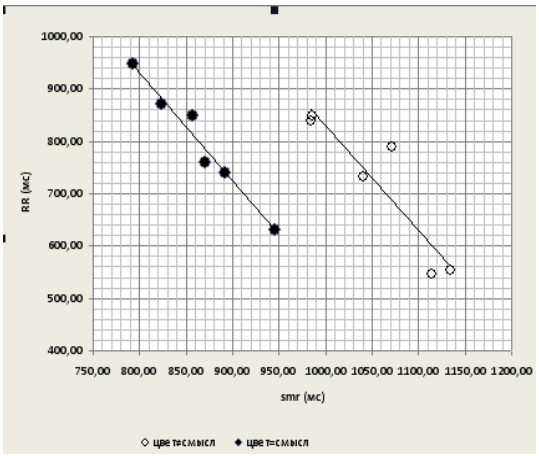


Рис. 5. Связь между временем реакции и ритмом сердца в тесте Струпа (n = 6)

Наиболее же затратными и по времени, и по энергии оказались задачи с выраженной конкуренцией цветового и смыслового образов (конкуренция). Выявлена сильная (0,97) корреляция межъязыковой разницы в средних RR-интервалах при переводе и при решении второй задачи Струпа (выбор цвета при условии, что в вербальном стимуле смысл слова соответствует цвету букв) (рис. 6).

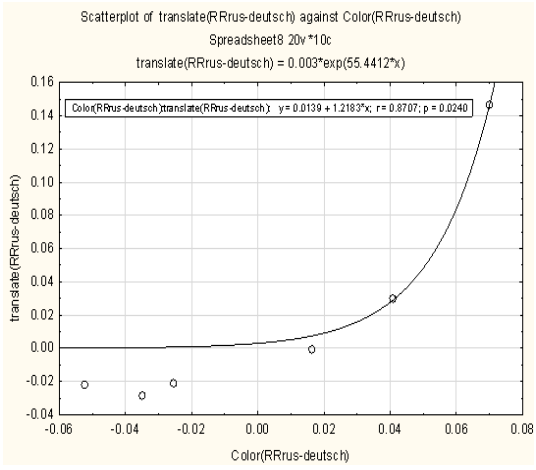


Рис. 6. Связь между межъязыковой разницей в средних RR-интервалах при переводе и при решении второй задачи Струпа (Color – вариант облегчения). По оси x – разница средних RR-интервалов, связанных с переводом с русского на немецкий язык и с переводом с немецкого на русский; по оси y – разница средних RR-интервалов, связанных с решением второй задачи Струпа в обоих тестах

Заключение

В нашем исследовании удалось проверить и частично подтвердить гипотезу трехфакторного психофизиологического механизма формирования высокой сложности синхронного перевода, основанную на необходимости наличия у переводчика: высокого уровня зрелости функциональной системы, определяющей владение родным или чужим языком («компетентности»); умения соответствовать темпу речи выступающего; оптимально выстроенной архитектуры взаимодействия информационных образов при решении задачи, требующей одновременной активации нейрональных модулей, вступающих не только в синергичные, но и в антагонистические взаимодействия (повтор – перевод, родной язык – иностранный язык). У высококвалифицированных переводчиков режим взаимодействия информационных образов обеспечивается механизмом консолидации (облегчения), по аналогии со второй задачей Струпа.

Работа выполнена при частичной поддержке РГНФ (грант 15-06-10894_а) и РФФИ (грант 16-06-00501_а).

Литература

1. *Petukhov A.Y., Polevaya S.A.* The bilingual Stroop test from the view of the Information Images Theory // Procedia Computer Science. 2016. V. 88. P. 415–422.

2. *Полевая С.А., Еремин Е.В., Буланов Н.А., Шишалов И.С., Чернова М.А., Парин С.Б.* Событийно-связанная телеметрия для детектирования имплицитного стресса в контекстах естественной деятельности // Процедуры и методы экспериментально-психологических исследований / отв. ред. В.А. Барабанщиков. М. : Институт психологии РАН, 2016. С. 69–75.

3. *Parin S.B., Polevaia S.A., Gromov K.N., Polevaia A.V., Kovalchuk A.V.* Short-term variability of R-R intervals during acute stress in healthy adults: neuromorphic model, experiment data, monitoring of daily life activity // International Journal of Psychophysiology. 2016. V. 108. P. 88.

Разработка программно-аппаратного комплекса для паспортизации жидких пищевых продуктов

А.М. Пахомов, О.В. Шемагина

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
olgashemagina@gmail.com

В России остро стоит проблема с контрафактными жидкими продуктами. Например, по данным Федеральной службы по регулированию алкогольного рынка, в России употребляется на 22 % больше алкогольной продукции, чем производится (применительно к водке) [1]. В связи с этим актуально появление технологий, способных дать толчок к изменению ситуации на алкогольном рынке.

При разработке когнитивных систем часто используются физические принципы, присущие живым системам [2–4]. В данной работе приведены результаты развития этих идей. В работах [3, 4] представлен прибор для проведения сенсорной диагностики многокомпонентных жидких сред на основе кварцевой пластины.

Капля исследуемой жидкости объемом 3 мкл высыхает на поверхности кварцевого резонатора, колеблющегося с постоянной частотой, равной резонансной частоте ненагруженного резонатора (60 кГц). В результате в капле возникает сдвиговая волна, чрезвычайно чувствительная к возникновению и росту новой фазы на границе жидкость – кварц. Изменение физических свойств жидкости отражается в изменении комплексной электрической проводимости объекта «резонатор + капля».

Собственная проводимость резонатора вычитается мостовой схемой, усиливается, детектируется амплитудным детектором и поступает на АЦП.

Показана применимость данной технологии для идентификации солевых и белково-солевых растворов, биологических жидкостей, что позволяет утверждать, что разработан новый способ анализа многокомпонентных жидкостей на основе сенсорного устройства, отличительной особенностью которого является получение «электронных подписей» жидкостей, пригодных для их идентификации и паспортизации. Информативную основу метода составляет динамика сложных процессов самоорганизации высыхающих капель, критичная к составу и структуре жидкости. Регистрация этой динамики позволяет получать количественные различия между сравниваемыми жидкостями, что может быть использовано для контроля их качества путем сравнения с эталоном.

В работе [5] описано применение технологии высыхающей капли для распознавания качества вин.

Принятие решения о соответствии (несоответствии) жидкости своему эталону строится на количественном сравнении формы кривых АМИ, которые представляют собой временную динамику амплитуды акустомеханического импеданса, по специальным алгоритмам и представлении результатов статистических различий на плоскости признаков ($M \pm 2\sigma$). В работе приводятся данные экспериментов по определению качества сухих и полусухих белых и красных вин, проводимых параллельно методом высыхающей капли и с помощью стандартизованной лабораторной экспертизы.

К недостаткам метода статистических различий на плоскости признаков можно отнести высокие требования к конечному пользователю прибора и высокую зависимость от параметров прибора, кварца. Пользователь должен самостоятельно выявить ряд признаков на кривых АМИ и в дальнейшем их сравнивать. Если в программном обеспечении данные признаки не обрабатываются, пользователю придется связываться с разработчиками и решать вопрос доработки ПО, что потребует времени.

Количественное сравнение формы кривых АМИ можно проводить в пространстве признаков, полученных при помощи метода главных компонент [6]. В качестве входных данных можно использовать дискретный рад значений амплитуды акустомеханического импеданса. Разработанный прибор регистрирует значения с интервалом 1,5 секунды на протяжении 17 минут – таким образом, исходный ряд содержит порядка шестисот значений. Для формирования пространства признаков при помощи метода главных компонент использовалось 67 полученных таким образом кривых АМИ для разных сортов вин.

Как известно, метод главных компонент является методом понижения размерности, и его использование позволяет в данном случае перейти от исходного более чем 600-мерного пространства признаков к пространству меньшей размерности. На рисунке 1 представлены собственные значения ковариационной матрицы, построенной на исходных данных. Видно, что классификация возможна уже при использовании 3–4 главных компонент.

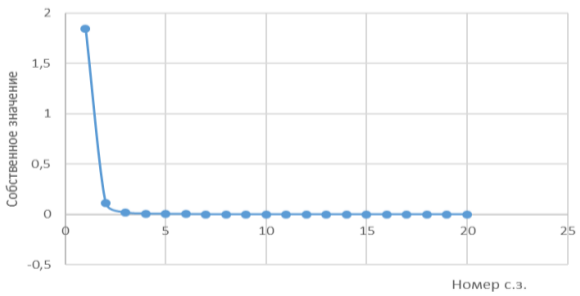


Рис. 1. Собственные значения для кривых амплитуды АМИ

На рисунке 2 представлены проекции тестовых данных в сформированное 3-мерное пространство главных компонент. В качестве тестовых данных использовались кривые АМИ, полученные на том же приборе для разных сортов вин, не использовавшихся для формирования пространства. Размер тестовой выборки – 22 кривых.

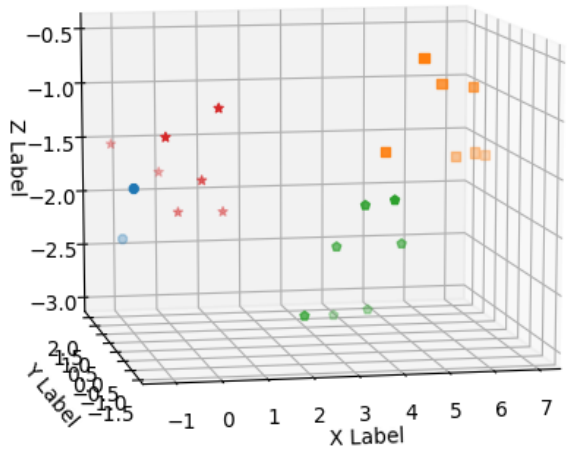


Рис. 2. Проекции тестовых данных в сформированное пространство признаков. X Label, Y Label, Z Label – три старшие собственные компоненты

Для классификации необходимо ввести решающее правило и метрику в этом пространстве признаков. Видно, что использование евклидова расстояния в качестве метрики и построение на этой основе решающего правила в данном случае неэффективно, потому что расстояния внутри класса могут быть меньше межклассовых. Применение метода опорных векторов [7] для классификации позволяет получить классификатор, точность которого достигает 92 %.

В обновленной модификации прибора (рисунок 3) в дополнение к амплитудному детектору добавлен фазовый детектор, что делает измеряемую информацию о комплексной электрической проводимости объекта «резонатор + капля» более полной. В частности, появляется возможность построения фазовых портретов динамики высыхания капли и сравнения жидкостей по их фазовым портретам.

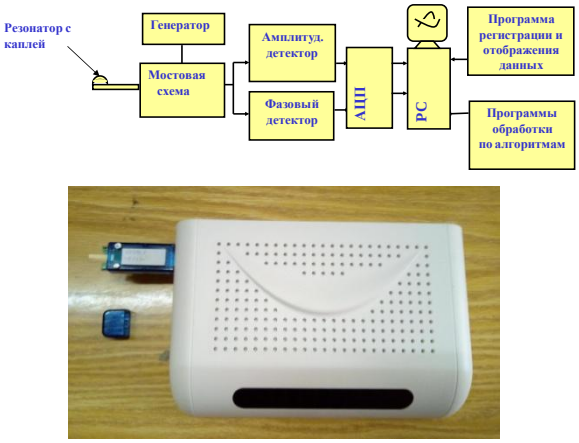


Рис. 3. Структурная схема и внешний вид обновленного прибора

Литература

1. Глава Росалкогольрегулирования Игорь Чуян – о нелегальном алкоголе, минимальной цене на водку и потреблении спиртного // Официальный сайт Росалкогольрегулирования. URL: http://www.fsrar.ru/news/view/?id=1291.

2. *Яхно Т.А., Яхно В.Г.* Изменение механических свойств высыхающей жидкости как универсальный сенсорный сигнал для восприятия запахов // Тезисы докладов конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2009». Н. Новгород, 2009. С. 201–202.

3. *Yakhno T.A., Yakhno V.G., Sanin A.G.* [*et al.*] // Proc. SPIE. 2003. V. 5119. P. 87–99.

4. *Яхно Т.А., Санин А.Г., Vacca C.V., Falcione F., Санина О.А., Казаков В.В., Яхно В.Г.* Новая технология исследования многокомпонентных жидкостей с использованием кварцевого резонатора. Теоретическое обоснование и приложения // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, вып. 10. С. 22–29.

5. *Яхно Т.А., Марковский М.Г., Санин А.Г., Санина О.А., Яхно В.Г.* Использование метода высыхающей капли для распознавания качества вин // Биотехнология. Взгляд в будущее : материалы III Международной научной интернет-конференции : в 2 т. / Сервис виртуальных конференций Pax Grid ; составитель Д.Н. Синяев. 2014. С. 159–161.

6. *Turk M., Pentland A.* Eigenfaces for Recognition // Journal of Cognitive Neuroscience. MIT Press, 1991. V. 3, № 1. P. 71–86.

7. *Chang C.-C., Lin C.-J.* LIBSVM : a library for support vector machines // ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. 2011. V. 2, iss. 3. Art. 27.

Динамическое инфракрасное картирование кожных покровов человека

С.А. Полевая[1], М.Г. Воловик[1,2], Е.П. Хижняк[3]

[1] Нижегородская медицинская академия
s453383@mail.ru
[2] Приволжский федеральный медицинский исследовательский центр Минздрава России, Нижний Новгород
afanassy@mail.ru
[3] Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, г. Пущино, Московская область
eugene@iteb.ru

Инфракрасное (ИК) излучение от кожных покровов является результатом взаимодействия локальных и центральных механизмов поддержания температурного гомеостаза. Активность каждого уровня регуляции проявляется в ИК-реакциях на температурную нагрузку. Информативность функциональной холодовой пробы (ХП) продемонстрирована многочисленными тепловизионными (ТПВ) исследованиями [1, 2].

Актуальным является поиск эффективных способов формализованного описания динамики термопаттернов кожных покровов при восстановлении температурного гомеостаза после холодовой нагрузки.

Методика

Исследования проводились на тепловизоре Thermo Tracer TH-9100 (NEC, Япония), работающем в спектральном диапазоне 8–14 мкм, обладающем чувствительностью 0,025–0,03 °С при погрешности ±1 % и с форматом ИК-матрицы 320×240 пикселей. Анализ ТПВ-данных проводился на персональном компьютере с помощью программы обработки термоизображений Goratec Thermography Studio (GTS 5.1.1.011).

Использовались два основных варианта региональных ХП. В первом случае проба заключалась в погружении сегмента конечности в резервуар с водой комнатной температуры (20–22 °С) на 1 минуту с регистрацией постстимульной динамики ИК-излучения от 7 минут (у здоровых испытуемых) и более (у пациентов с нарушениями иннервации или кровообращения в исследуемом участке кожи). В качестве «мягкого» холодового воздействия применялась спиртовая проба – равномерное распыление 70 % этилового спирта на участок кожи до достижения снижения температуры не менее чем на 3 °С от исходной, с постстимульной регистрацией ИК-излучения от 3 минут (у испытуемых) и более (у больных).

Результаты и обсуждение

Состояние кожи как сложной системы зависит от комплекса эндогенных и экзогенных факторов. Эндогенные факторы определялись состоянием кожных покровов и иннервации их структур: 1) здоровый участок кожи и ненарушенные нервные пути управления терморегуляторными процессами; 2) прерывание одного или нескольких звеньев в системе терморегуляции; 3) поврежденные кожные покровы при интактной терморегуляции. Экзогенными факторами служили температурные функциональные пробы.

Для анализа особенностей температурных реакций при различных эндогенных контекстах стояла задача определить типичную ИК-динамику восстановления в ответ на ХП, а также установить закономерности в искажении ИК-динамики при известном уровне прерывания путей передачи информации.

Показано, что использование физиологически адекватной холодовой стимуляции при нормальной нервной регуляции и здоровых кожных покровах вызывает однотипные термореакции (рис. 1).

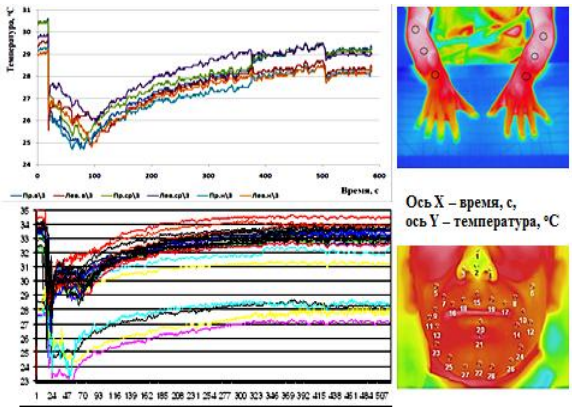


Рис. 1. Термограммы реакции на охлаждение разных зон кожных покровов здорового испытуемого. *Вверху* – термореакции на региональную ХП в трех парах симметричных зон на предплечье, *внизу* – термограммы ИК-реакции на спиртовую пробу в 32 областях на лице (4 нижних кривых – нос)

В норме выявлены значимые эффекты, связанные с локализацией участка кожи и номером повтора температурной пробы на массиве, включающем последовательность абсолютных значений температуры, взятых с интервалом в 1 с. Дисперсионный анализ показал достоверно высокий уровень корреляции температурных изменений на ХП между различными участками кожи. Обнаруженные высокие корреляции между динамикой ИК-реакций на ХП в разных участках кожи позволяют говорить об их инвариантности по абсолютным значениям температур.

Структура термореакций также инвариантна по отношению к локализации участков здоровой

кожи на теле человека или животных, что выражается в наличии одинаковой последовательности этапов на кривой восстановления температуры после пробы, несмотря на различные пространственно-временные и амплитудные характеристики ответов.

Типичная кривая динамики ИК-ответа участка кожи на ХП в норме приведена на рис. 2. В физиологических условиях на кривой в реакции на ХП отмечены 5 фаз: 1) снижение температуры; 2) пассивное повышение температуры; 3) активное повышение температуры; 4) реактивная гипертермия; 5) нормальные флуктуации (идентичные предстимульному стационарному состоянию системы). Каждая фаза является функцией от динамически меняющихся переменных эндогенного и экзогенного происхождения. Особенности фаз связаны с активностью разных уровней регуляции.

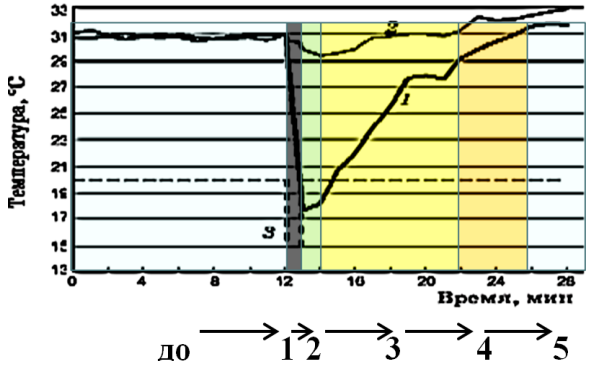


Рис. 2. Типичная кривая динамики ИК-излучения в ответ на ХП в стимулируемом (*1*) и симметричном нестимулируемом (*2*) участках кожи на пальцах рук в норме. Сдвиг на линии *3* – время экспозиции хладагента на стороне стимуляции

Известно, что управление в системе терморегуляции зависит от большого числа переменных величин, и зависимости носят сложный характер [3]. Биофизические и физиологические характеристики стимулируемого участка кожи, влияющие на параметры типичной кривой термореакции на охлаждение, многочисленны и еще подлежат тщательному изучению. Мы полагаем, что значимыми переменными являются:

- в фазе снижения – температура, время и площадь аппликации стимула; исходная температура стимулируемого участка кожи; локализация участка кожи;

- в фазе пассивного повышения температуры – состояние резистивных сосудов (артерий, артериол) в стимулируемом участке кожи; состояние симпатической иннервации участка кожи на различных уровнях: от бокового рога спинного мозга через шейные ганглии и до постганглионарных волокон в периферических нервах; состояние соматической иннервации (прежде всего сенсорных волокон); толщина слоя подкожно-жировой клетчатки;

- в фазе активного повышения температуры – состояние резистивных сосудов в стимулируемом участке кожи; состояние симпатической иннервации участка кожи на различных уровнях; состояние сенсорных волокон; площадь аппликации стимула; температура среды; положение тела и части тела со стимулируемым участком кожи; наличие дополнительных глубинных источников измененной теплопродукции (например, опухоли, отека, воспалительного очага и т. п.);

- в фазе реактивной гипертермии – состояние центральных терморегуляторных структур, а также температура среды;

- в фазе нормальных флуктуаций (= фону) – все эндогенные параметры в нормальных значениях, т. е. в физиологических пределах индивидуального статуса при температуре среды в пределах адаптационного коридора.

В нашем случае на всех этапах имеет значение $\Delta T = T_{\text{кожи}} - T_{amb}$, где $T_{\text{кожи}}$ – исходная температура кожи, T_{amb} – температура среды, а также площадь и длительность аппликации стимула.

Очевидно, что пространственно-временные и амплитудные характеристики ИК-ответов от кожных покровов на ХП отображают динамические режимы работы терморегуляторной системы. Включение системной реакции в постстимульной динамике ИК-характеристик можно отслеживать по изменениям температуры на симметричном участке кожи, где ход кривой ИК-реакции отражает сначала фазу независимой от стимуляции динамики, а затем – подключение за счет системного уровня регуляции кровотока (см. рис. 2).

Универсальность динамической кривой ИК-реакции на ХП как отображения работы механизмов локальной и центральной кожной терморегуляции доказывают модели, где экспериментально либо в результате клинических случаев нарушен обмен информацией между управляющими и эффекторными структурами. Сравнивая получаемые ИК-данные с этой эталонной кривой при здоровых кожных покровах, мы можем отследить характер и степень изменений на разных уровнях терморегуляторной системы. Примеры подобных искаженных режимов приведены на рис. 3.

На рис. 3, *А* на нижней кривой – нарушение активного компонента ответа на охлаждение после пассивной фазы при периаксональной блокаде нерва; верхняя кривая – до блокады. На рис. 3, *Б* при полном перерыве нерва в автономной зоне его иннервации отсутствуют признаки активной регуляции. При одинаковом уровне нарушения проводимости в этих двух случаях характер искажения механизмов терморегуляции различен.

Анализ влияния изменения контекстных условий регистрации, например наркотизации, на ход кривой восстановления позволяет выявить роль разных уровней в контуре управления системы терморегуляции. Так, на 20 и на 30 минутах нембуталового наркоза у крысы наблюдается последовательное снижение как исходных температур охлаждаемого участка кожи, так и амплитудных характеристик ИК-сигнала, вплоть до полного искажения хода кривой восстановления (рис. 4).

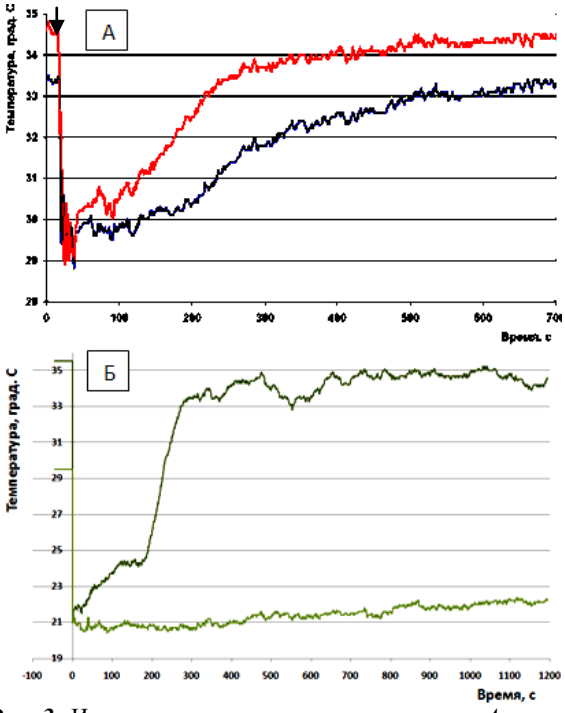


Рис. 3. Искаженные режимы терморегуляции: *А* – термореакция на охлаждение в зоне иннервации нерва до его блокады лидокаином (верхняя кривая) и на ее фоне (нижняя кривая); *Б* – термореакция на двустороннюю ХП на кистях рук: нижняя кривая – участок кожи в автономной зоне иннервации прерванного нерва, верхняя кривая – симметричный участок кожи на здоровой руке. Отрицательные значения на оси *X* – фоновая запись до пробы. Стрелка – момент аппликации стимула

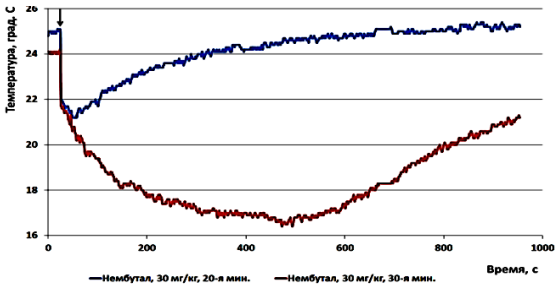


Рис. 4. Термореакции на охлаждение подошвы крысы на разных стадиях наркотизации (нембутал, 30 мг/кг): на 20-й мин. (верхняя кривая); на 30-й мин. (нижняя кривая). Стрелка – момент аппликации стимула

Установлено, что в норме в ответ на ХП восстановление следует логарифмическому закону, а та или иная степень редукции системных механизмов отражается в отклонении от логарифмической зависимости и переходе к линейной (рис. 5).

На рис. 5 для верхней кривой, соответствующей термореакции в норме, наблюдается логарифмическая зависимость скорости роста температуры от времени с величиной достоверности аппроксимации R^2 = 0,9868, для средней кривой (участок кожи в зоне иннервации рубцово-сдавленного нерва со сниженной проводимостью) также еще преобладает логарифмическая зависимость с R^2 = 0,9461, а для нижней кривой, отражающей реакцию в зоне иннервации полностью прерванного нерва, уже преобладает линейная зависимость с R^2 = 0,9843.

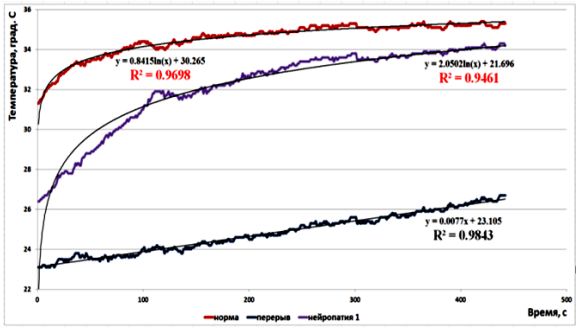


Рис. 5. Особенности динамики термореакций при нарушении проводимости в периферических нервах (приведены фазы кривых на этапе восстановления). Верхняя кривая – норма, средняя – ишемическая нейропатия, нижняя – полный перерыв периферического нерва

Установленная нами логарифмическая зависимость прироста температуры от времени восстановления свидетельствует о нелинейности проявления объективных физиологических механизмов в динамике ИК-излучения при терморегуляторных процессах в биологических тканях. В нашем случае в норме (при целостных путях периферической терморегуляции и здоровых кожных покровах) налицо проявление фундаментальной закономерности, которая неизбежно должна искажаться при нарушении в любом модуле терморегуляторного контура.

Полное прерывание связи между управляющими и эффекторными структурами выражается в нормальном распределении, при несоответствии же динамики температур нормальному распределению можно констатировать сохранение активного компонента регуляции (рис. 6). Из рис. 6, *Б* очевидно сохранение активного компонента регуляции: динамика не полностью соответствует нормальному распределению, поскольку значения коэффициента по критерию Шапиро – Уилкса меньше 1.

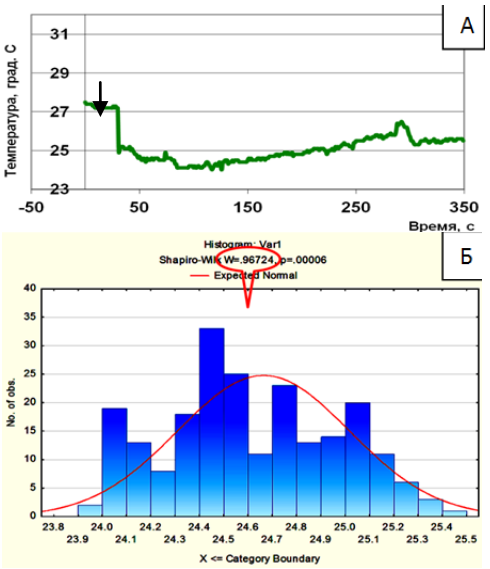


Рис. 6. Термореакция на охлаждение участка кожи на тыльной стороне стопы на фоне начала общей анестезии севораном (*А*). Гистограмма распределения температур на этапе восстановления после пробы (*Б*). Стрелка – момент аппликации стимула

Знание модели ИК-реактивности для любого участка кожи перспективно для разработки атласа термотопографии тела здорового человека, у которого интактны все модули системы терморегуляции. Очевидно, что при интактных кожных покровах динамическое ИК-картирование отображает текущее состояние терморегуляторной системы, и в этом случае отклонения от типичной кривой температурного ответа на пробу свидетельствуют о нарушениях регуляции. При сохранности всех уровней нервной регуляции регистрируемые динамические режимы работы функциональной системы кожной микроциркуляции позволяют оценить адаптационные и компенсаторные ресурсы участка кожи. Так, регрессионный анализ кривых ИК-динамики в ответ на спиртовую пробу позволяет оценить состояние кровоснабжения различных участков рубцовой кожи: отмечено снижение логарифмической зависимости температуры от времени восстановления в направлении от здоровой кожи к грубым рубцам (рис. 7, сверху вниз).

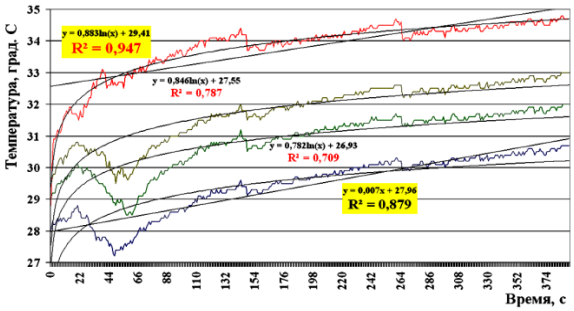


Рис. 7. Динамика ИК-ответа на СпП на участках послеожогового рубца

Таким образом, при здоровых кожных покровах можно отследить характер и степень изменений на разных уровнях нервной системы, сравнивая полученные ИК-данные с типичной кривой (например, нарушение проводимости по периферическим нервам либо повреждение спинальных или надсегментарных модулей управления терморегуляцией). Холодовая температурная проба запускает терморегуляторные процессы, а основные фазы терморегуляторной активности и их редукция или искажения отражают нарушения работы структур на разных уровнях терморегуляторной системы.

Предложенная модель динамики ИК-реакции на ХП позволила впервые исследовать зависимость реактивности периферического кровотока при продленной проводниковой анестезии от возраста ребенка, определить критерии оценки функционального состояния регуляции периферического кровотока в норме, при прерывании нервной проводимости в ситуациях спинномозговой анестезии, периаксональных блокад периферических нервов, диабетической нейропатии и анатомического перерыва периферических нервов, при нарушениях нервной регуляции кровообращения на разном уровне.

Дальнейшей задачей мы видим изучение закономерностей поведения конкретных участков стимулируемых кожных покровов, характера и степени отклонений переходного процесса восстановления от логарифмического закона, а самое главное – физиологической значимости каждого фрагмента кривой восстановления, что позволит говорить о нарушениях кровотока либо нейрорегуляторных процессов. Предполагается возможным создание методических рекомендаций, построенных на основании описания фрагментов кривой со схемой, отражающей диапазон сектора нормы и секторов с различной степенью отклонений от нее, каждое из которых будет соотнесено с конкретными известными нарушениями.

Литература

1. *Wright C.I., Kroner C.I., Draijer R.* Non-invasive methods and stimuli for evaluating the skin's microcirculation // J. Pharmacol. Toxicol. Methods. 2006. V. 54 (1). P. 1–25.

2. *Крупаткин А.И., Сидоров В.В.* Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем. Колебания, информация, нелинейность : руководство для врачей. М. : Книжный дом Либроком, 2014.

3. *Иванов К.П.* Основы энергетики организма. Т. 5 : Энергетика живого мира. Физиологические проблемы. СПб. : Наука, 2007. 257 с.

Нейрофизиологические маркеры контроля поведения в парадигмах go/nogo и novel

П.А. Продиус

Нижегородская государственная медицинская академия Минздрава России

Введение

Выполнение умственной или операторской деятельности, а также управление сложными техническими средствами осуществляется при участии системы контроля поведения. Она включает в себя лобную ассоциативную и премоторную кору, инсулу, поясную извилину, стриатум, бледный шар и таламус [1, 2]. К ее функциям относят селекцию нужных действий, подавление ненужных действий и переключение с одного действия на другое [3]. В процессе деятельности могут возникать конфликты между релевантной и нерелевантной информацией.

Для исследования умственной деятельности, где требуется торможение ответа на нерелевантный стимул, был разработан нейрофизиологический тест или парадигма go/nogo [4]. Один из стимулов требует сенсомоторной реакции (go-стимул), второй – нет (nogo-стимул). Для выявления нейрофизиологических механизмов контроля поведения этот тест стали проводить с одновременной регистрацией связанных с событием потенциалов (ССП). Было обнаружено, что при выполнении go/nogo-теста возрастает активность префронтальной области, выполняющей функции поддержания произвольного внимания для реакции на целевой стимул и подавления ответов на нерелевантные стимулы [5]. В качестве нейрофизиологических маркеров этих процессов рассматривают такие компоненты вызванных потенциалов, как негативная волна N200 и позитивная волна P300.

Первый компонент (N2) возникает в ответ на нерелевантный стимул (nogo) и представляет собой отрицательный пик с латентностью в пределах 200–300 мс. Увеличение амплитуды волны N2 в ответ на nogo-стимулы может быть связано с усилением подавления ответа с целью избежать неправильной реакции [6], возможно также, N2 отражает конфликт между двумя альтернативами ответами [7]. Другой нейрофизиологический компонент – позитивная P300. Амплитуда волны P3 увеличивается в ответ на стимулы nogo [8] и наиболее выражена в центрально-фронтальных областях [9]. Изменение амплитуды волны P300 считают связанными с механизмами подавления ответа. Самый поздний компонент – условное негативное отклонение (CNV) – связывают с двигательной подготовкой [10]. Другая парадигма с использованием нерелевантного стимула называется novel. Редкие нецелевые стимулы используются в качестве отвлекающего фактора. Нейрофизиологическим маркером является лобная позитивная волна P3a [11].

Одно из нарушений, которое связывают с контролем поведения, – синдром нарушения внимания с гиперактивностью [1]. При этом нарушении нейрофизиологическим маркером СНВГ является снижение позитивной волны P300 в теменных отведениях в пробе nogo. С возрастом амплитуда этой волны увеличивается, а затем наблюдается возрастная редукция с одновременным увеличением этой волны в лобных отделах. У взрослых большее внимание уделяют изучению негативной волны N200. СНВГ у взрослых проявляется в снижении амплитуды компонента P3a на стимулы novel.

Методическая цель исследования заключалась в разработке методики, позволяющей иметь одновременно задания разной сложности (используя одновременно go/nogo- и novel-парадигмы) и получить достаточное количество ошибок для усреднения ССП. *Экспериментальной целью* являлась попытка сравнить ССП у точных и неточных испытуемых в заданиях разной сложности.

Методы

Участники исследования – 18 испытуемых в возрасте от 18 до 23 лет (9 молодых людей и 9 девушек) с нормальным или корректированным зрением. Стимульный материал – буква Н (go), буква И (nogo) и набор из 20 символов (novel) типа знаков «больше» и «меньше» (> и <), решеток (#), процентов (%) и т. д. Дизайн эксперимента – испытуемые смотрели в центр экрана и нажимали на кнопку, если видели букву Н. В других случаях кнопку нажимать было не нужно. Всего было 480 стимулов go, 80 nogo и 80 novel. 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, после чего появлялся целевой стимул (go, nogo или novel) до нажатия кнопки или на 1400 мс. После 320 циклов делали перерыв. Регистрация ЭЭГ осуществлялась на энцефалографе «Нейрон-СпектрВПМ «Нейрософт» с помощью программы «Нейрон-Спектр.Net» с частотой дискретизации 1000 Гц в 9 отведениях (Fz, Cz, Pz). Анализ поведения – сравнивали средние значения времени реакции в пробе go. Анализировали количество ошибок: пропуск go, нажатие кнопки в пробе nogo и novel. Анализ ССП – сравнивали усредненные отрезки ЭЭГ в 600 мс после предъявления nogo- и novel-стимулов. Проводили корреляционный анализ поведенческих и нейрофизиологических показателей по Пирсону. Достоверность поточечного сравнения средних значений амплитуды ССП и времени реакции проводи-

ли с помощью *t*-критерия Стьюдента. Коррекцию на множественное сравнение с помощью критерия перестановок проводили в модуле NME для Python [12, 13, 14].

Результаты

Поведение. Среднее время реакции в пробе go было выше, чем в случае ошибочного нажатия в пробе nogo и novel (таблица). Учитывая распределение ошибок, go можно отнести к легкому заданию, novel к средней сложности, nogo к трудному. Более быстрое нажатие кнопки при совершении ошибки наводит на мысль о более высокой импульсивности поведения (низком контроле поведения). В связи с этим был проведен корреляционный анализ среднего времени реакции в пробе go и количества ошибок в самом трудном задании – nogo. Обнаружена обратная зависимость (рис. 1) между временем реакции go и количеством ошибок в пробе nogo с высоким отрицательным уровнем корреляции –0,59 ($p < 0,02$). Таким образом, для трудного задания обнаружена связь между временем реакции для простого и частого (более автоматизированного) задания и вероятностью совершить ошибку в более трудном и редком задании, требующем большего произвольного контроля.

Среднее время реакции,
среднее количество ошибок и процент
от общего количества в пробах go, nogo и novel

Пробы	Время, мс	Ошибки, шт. (%)
Go	357,7	10 (2,1)
Nogo	295,5	25,2 (31,5)
Novel	250,3	9,4 (11,75)

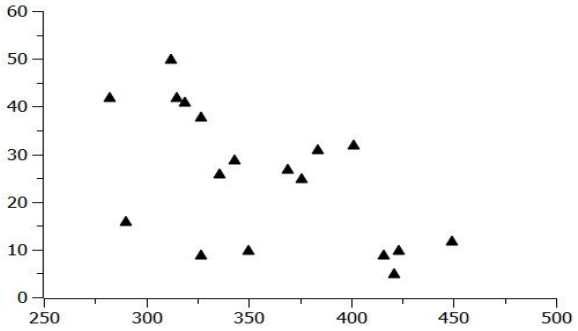


Рис. 1. Скатерграмма корреляционного анализа. По оси *X* – среднее время go (мс) по оси *Y* – количество ошибок nogo

Сравнение ССП на предъявление стимулов nogo в Fz. Визуально ССП обеих групп имеют более выраженные по амплитуде поздние компоненты (N200, P300 и CNV) и низкоамплитудные ранние компоненты P50 и N100. Сравнение ССП между точными и неточными на предъявление nogo-стимула после коррекции на множественное сравнение не выявило достоверных отличий (рис. 2). Тем не менее были выявлены тенденции увеличения амплитуды и пиковой латентности волны N200 и пиковой латентности компонента P300 в группе неточных испытуемых. Ранее было обнаружено увеличение амплитуды N200 у неточных лиц [15], кроме того в трудных заданиях увеличивается пиковая латентность P300.

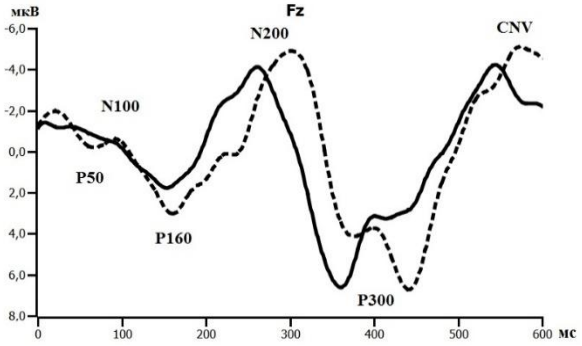


Рис. 2. Кривые ССП на предъявление нерелевантного стимула nogo в группе более точных (сплошная линия) и менее точных (пунктирная линия)

Сравнение ССП на предъявление стимулов novel в Fz (рис. 3). На кривых ССП хорошо различимы все известные компоненты. Поздние компоненты ССП для этого задания меньше по амплитуде, чем для пробы nogo. Для группы неточных выявлена тенденция к замедлению пиковой латентности волн P300 и CNV и уменьшению амплитуды P300. Поскольку novel-стимулы носят отвлекающий характер, замедление латентности поздних компонентов мы связываем с процессом внешнего торможения, или повышенной отвлекаемостью в неточной группе.

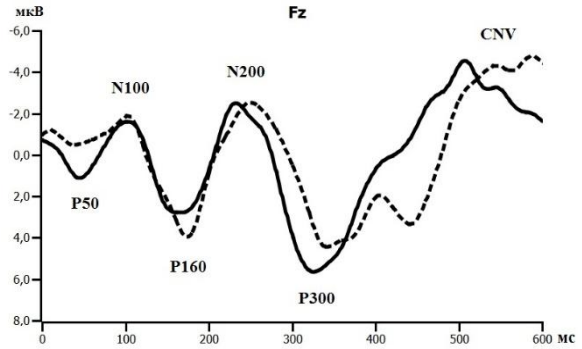


Рис. 3. Кривые ССП на предъявление нерелевантного стимула novel в группе более точных (сплошная линия) и менее точных (пунктирная линия)

Обсуждение

Низкий контроль поведения связан с повышенной импульсивностью и более быстрой реакцией. К нейрофизиологическим особенностям такого поведения можно отнести уменьшение амплитуды и увеличение пиковой латентности компонента P300 у более импульсивных лиц, больных алкоголизмом, школьников и студентов с низкой успеваемостью [15]. У взрослых низкий контроль поведения в зависимости от трудности и характера задания может коррелировать с изменением амплитуды волны N200. В нашем случае при увеличении трудности конфликтной ситуации в про-

бе nogo наблюдалось увеличение амплитуды N200 и пиковой латентности P300, особенно в неточной группе.

Исследования в данном направлении представляются перспективными для создания управляющих интерфейсов с использованием нейрофизиологических маркеров контроля поведения в образовании, областях, связанных с высокой умственной нагрузкой.

Литература

1. *Кропотов Ю.Д.* Роль стриатума в селекции действий // Физиологический журнал. 1997. Т. 83, № 1. С. 45–48.

2. *Perri R.L., Berchicci M.* Individual differences in response speed and accuracy are associated to specific brain activities of two interacting systems // Front. Behav. Neurosci. 2014. V. 8. P. 251.

3. *Кропотова О.В., Пономарев В.А.* Компоненты подавления движения в вызванных потенциалах головного мозга подростков // Физиология человека. 1998. Т. 24, № 2. С. 23–32.

4. *Rosvold H.E.* [*et al.*] A continuous performance test of brain damage // J. Consulting Psychology. 1956. V. 20 (5). P. 343.

5. *Miller E.K., Cohen J.D.* An integrative theory of prefrontal cortex function // Annu. Rev. Neurosci. 2001. P. 167–202.

6. *Geczy I.* [*et al.*] Effects of cue information on response production and inhibition measured by event-related potentials // Acta Physiol. Hung. 1999. V. 86. P. 37–44.

7. *Nieuwenhuis S.* [*et al.*] Electrophysiological correlates of anterior cingulate function in a go/no-go task : Effects of response conflict and trial type frequency // Cogn. Affect. Behav. Neurosci. 2003. V. 3. P. 17–26.

8. *Eimer M.* Effects of attention and stimulus probability on ERPs in a Go/Nogo task // Biol. Psychol. 1993. V. 35. P. 123–138.

9. *Fallgatter A.J., Strik W.K.* The NoGo-anteriorization as a neurophysiological standard-index for cognitive response control // Int. J. Psychophysiol. 1999. V. 32. P. 233–238.

10. *van Boxtel G.J.* [*et al.*] A psychophysiological analysis of inhibitory motor control in the stop-signal paradigm // Biol. Psychol. 2001. V. 58. P. 229–262.

11. *Polich J., Criado J.R.* Neuropsychology and neuropharmacology of P3a and P3b // Int. J. Psychophysiol. 2006. V. 60. P. 172–185.

12. *Gramfort A.* [*et al.*] MNE software for processing MEG and EEG data // NeuroImage. 2014. V. 86. P. 446–460.

13. *Gramfort A.* [*et al.*] MEG and EEG data analysis with MNE-Python // Frontiers in Neuroscience. 2013. V. 7. Art. 267.

14. https://www.nmr.mgh.harvard.edu/mne/stable/index.html.

15. *Chen A.C., Poricsz B.* Reduced frontal lobe activity in subjects with high impulsivity and alcoholism // Alcohol Clin. Exp. Res. 2007. V. 31 (1). P. 156–165.

Синапс как многокомпонентная и многоуровневая когнитивная система

А.Л. Проскура, Т.А. Запара, А.С. Ратушняк

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск
annleop@mail.ru

Введение

Одним из важнейших информационных процессов, лежащих в основе опережающего отражения на уровне мозга, является память. По современным представлениям память определяется структурой связей в сетях нейронов, которые основаны на молекулярных перестройках внутриклеточных сигнальных систем. Межнейронные связи в мозге образуются, усиливаются и становятся более обширными в результате синаптических модуляций, зависящих от опыта [1]. Нейрон имеет множество синапсов и может быть членом многих ассоциативных сетей и, следовательно, многих элементов знания. Становится очевидным, что связи в сетях мозга, в том числе ассоциативные, возникают в пределах нейрона благодаря его биофизическим свойствам, а также молекулярным реакциям, которые инициируются внешними воздействиями и приводят к перестройкам внутриклеточных молекулярных систем. Все это в конечном счете служит базисом обучения и запоминания на молекулярном уровне, а также опосредует анализ и дополнение образа внешнего сигнала, обеспечивая опережающее отражение внешней среды. Однако конкретные механизмы работы этой молекулярной машины пока до конца не ясны. Например, зависимые от активности модификации шипиковых синапсов пирамидных нейронов гиппокампа опосредуются взаимодействиями между более чем тысячей различных белков (нейрональный молекулярный интерактом), что определяет равновесие между усилением эффективности и стабильностью синаптических связей [2].

Синапс как многокомпонентная динамическая система анализа и обработки информации

Ведущую роль в информационных процессах, лежащих в основе когнитивности, играют сенсорные структуры клеток – синапсы. Синапс (греч. σύναψις, от συνάπτειν – соединение, связь) – место контакта между двумя нейронами: между нейроном (пресинаптическая часть, образуемая аксоном) и получающей сигнал эффекторной клеткой (постсинапс, участок плазматической мембраны дендрита или сомы нейрона). Связь осуществляется посредством электрического (электрические синапсы) или химического (медиатор) сигнала, который выбрасывается в синаптическую щель.

У нейронов лимбической системы и коры часто постсинаптической частью возбуждающих синапсов выступают микровыросты дендритов – дендритные шипики. Эти структуры богаты актином, и патология в их морфологии и плотности сопутствует ряду психических расстройств [3]. Считается, что данные структуры обеспечивают локальность входящих потоков ионов в течение синаптической активности [4].

Дендритный шипик, несмотря на свой малый размер (от 0,2 до 2 мкм), обладает упорядоченной компартментной организацией на горизонтальном (мембрана шипика – синаптическая, перисинаптическая, экстрасинаптическая) и вертикальном (межбелковые сети сигнальных и структурных белков, постсинаптическое уплотнение (ПСУ)) уровнях [5–7]. Каждый компартмент наделен специфическим набором белков и выполняет определенную функцию в процессах регулирования синаптической пластичности. В настоящий момент идентифицировано более тысячи белков дендритных шипиков в мозге млекопитающих [2, 8].

В ответ на внешний сигнал в дендритных шипиках формируется белок-белковая сеть межмолекулярных взаимодействий, обеспечивающая прием и запоминание сигнала. Синаптические рецепторы обеспечивают усиление приходящего сигнала и его передачу далее в сеть межсинаптических контактов. При этом в ответ на приходящий сигнал меняется эффективность самого синапса, что выражается в виде продолжительного усиления (долговременная потенциация) либо ослабления (долговременная депрессия) нейротрансмиссии.

В зоне непосредственно синаптического контакта (синаптическая мембрана) располагаются специфические рецепторно-канальные комплексы, обеспечивающие прием медиатора, выбрасываемого пресинаптической терминалью аксона. Медиатор активирует специфические к нему рецепторы постсинапса, что меняет деполяризацию мембраны и распространение возбуждения по нейрональной мембране к аксонам. При этом часть таких рецепторов относится к ионотропным, которые обеспечивают вход в постсинапс ионов кальция, что запускает каскады молекулярных реакций, приводя в конечном итоге к изменению эффективности синаптической трансмиссии [4]. Другая часть рецепторов относится к метаботропным рецепторам, которые связаны с G-белковым комплексом и модулируют уровень продукции вторичных мессенджеров [9].

Так, возбуждающую нейропередачу в высших отделах мозга млекопитающих обеспечивает глутаминовая кислота [10, 11], которая является агонистом для нескольких типов глутаматных рецепторов – НМДА (также чувствительны к действию N-метил-D-аспарагиновой кислоты), АМПА (чув-

ствительны к α-амино-3-гидрокси-5-метил-4-изоксазолпропионовой кислоте) и каинатных рецепторов (чувствительны к каинатной и квисквалатной кислотам).

НМДА-рецепторы (НМДАР) опосредуют быструю возбуждающую нейропередачу и способны конвертировать специфические паттерны нейрональной активности в долговременные изменения синаптической структуры и функций, что, как предполагают, лежит в основе высших когнитивных функций [12, 13].

НМДА-рецепторы являются обязательным составляющим элементом глутаматного синапса и располагаются по центру синаптической мембраны, которая позиционирована под пресинаптической терминалью [6]. Собираются они из гликопротеин-липидных субъединиц [13], которые формируют несколько подтипов макрокомплексов в зависимости от своего субъединичного состава [14]. Эти рецепторы обладают медленной динамикой запуска, так как для их активации необходимо совпадение химического сигнала (нейромедиатор) с определенным потенциалом на мембране, что обеспечивается АМПА-рецепторами (АМПАР), которые располагаются по периферии синаптической зоны [8, 15].

Перисинаптическая мембрана непосредственно примыкает к синаптической, на границе этих двух компартментов часто размещаются ионотропные калиевые, кальциевые каналы, рецепторы ростовых факторов и пр. [8]. На перисинаптической мембране располагаются метаботропные глутаматные рецепторы (mGluR1/5) [16]. Через белки ПСУ происходит ассоциация макрокомплексов НМДАР с рецепторами перисинаптической мембраны. Такая ассоциация может быть постоянной, как в случае с метаботропными рецепторами (mGluR1α/5) и рецепторами, контролирующими выброс кальция из внутриклеточного депо (IP3R). Такое объединение белков обеспечивает функциональную организацию mGluR1α/5-InsP3R-Ca^{2+} сигнального пути в дендритных шипиках [17] (рисунок). Либо может происходить временная ассоциация в ответ на активирование рецепторов. Так, известно, что формируется тройничный комплекс между рецепторами ростовых факторов и белками макрокомплексов НМДАР после связывания ростовых факторов со своими рецепторами, что в конечном итоге обеспечивает активирование ERK-киназного сигнального пути, который важен для запуска транскрипции генов в ответ на активирование синапсов [18, 19].

Несмотря на то что основным медиатором возбуждающих синапсов является глутамат, на мембране их дендритных шипиков присутствуют рецепторы других медиаторных систем, в частности дофаминовые рецепторы.

Так, например, в поле CA1 гиппокампа, нейроны которого образуют возбуждающие глутаматные синапсы, обнаружены дофаминовые рецепторы D1/D5-типа [20, 21]. Установлено, что их активирование модифицирует долговременную синаптическую пластичность в синапсах поля CA1 гиппокампа через G-белки, которые контролируют аденилатциклазную систему, что обеспечивает снижение порога индукции НМДАР-зависимой долговременной потенциации [22]. Важно отметить, что в экспериментах показано, что такое модулирующее действие дофаминовых рецепторов проявляется при обучении в новой обстановке [23].

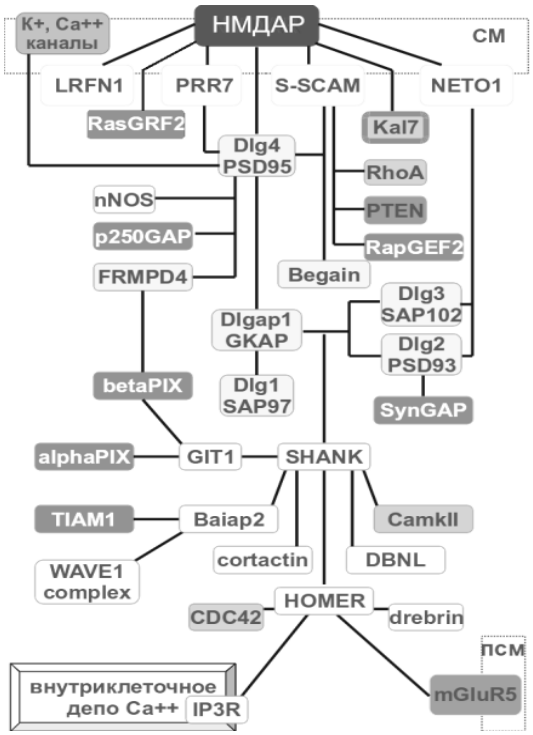


Рис. Схематичное представление белковых макрокомплексов НМДА-рецепторов: СМ – синаптическая мембрана; ПСМ – перисинаптическая мембрана

Регулирование плотности ионотропных глутаматных рецепторов АМПА-типа (АМПАР), как считается, является ключевым механизмом изменения и поддержания эффективности синаптической передачи [24]. Именно этот тип рецепторов обеспечивает деполяризацию синаптической мембраны в ответ на выброс глутамата, что в конечном итоге опосредует активирование НМДА-рецепторов и, как следствие, запуск молекулярных каскадов постсинапса. В результате в зоне синаптической мембраны устанавливается новая плотность АМПА-рецепторов. Увеличение плотности АМПАР определяет долговременное потенцирование, усиление межсинаптической связи.

Регулирование плотности синаптических АМПАР – высоко динамичный процесс и происходит на различных уровнях. На уровне синаптической мембраны регулирование обеспечивается главным образом за счет закрепления и открепления от белков ПСУ. Метаботропные глутаматные рецепторы запускают молекулярные реакции, которые можно рассматривать в качестве обратной петли негативной регуляции плотности синаптических АМПАР через их выведение из синаптической зоны и эндоцитоз [25–27]. На уровне дендритного дерева также запускаются регуляторные

реакции, которые направлены на снижение плотности АМПАР в рядом расположенных дендритных шипиках, которые являются компонентами разных синаптических сетей. Этот процесс масштабирования АМПАР в рядом расположенных дендритных шипиках может служить, как предполагают, для снижения общего возбуждения на дендритах [28]. Поддержание нового уровня плотности АМПАР и, соответственно, нейротрансмиссии зависит от целостности везикулярной системы нейрона и тесно коррелирует с доставкой вновь синтезированных белков из сомы [29]. Активность дофаминовых рецепторов обеспечивает поддержание более высокой плотности синаптических АМПАР, что, вероятно, и опосредует фасилитацию НМДАР-зависимой долговременной потенциации [30].

Таким образом, дендритный шипик выступает не как пассивный приемщик поступающего сигнала, а как сложно организованная многокомпонентная молекулярная система, способная не только воспринимать передаваемый через выброс медиатора сигнал пресинапса, но и ассоциировать его с сопутствующими внешними сигналами через немедиаторные лиганды.

Таким образом, в дендритных шипиках можно выделить несколько молекулярных систем: систему приема основного сигнала – макрокомплексы НМДАР, систему приведения плотности АМПАР к некоему гомеостатическому оптимуму через запуск негативной петли регуляции метаботропных глутаматных рецепторов, систему регулирования выравнивания возбуждения на уровне дендрита, систему подкрепления через позитивную петлю увеличения плотности АМПАР в случае новизны сигнала, реализуемую через дофаминовые рецепторы. Все компоненты систем имеют строгую локализацию в компартментах дендритных шипиков, но формируют ассоциативные, постоянные либо временные, связи с макрокомплексами НМДАР.

Заключение

На уровне синапса обеспечивается функциональная организация различных сигнальных путей, обеспечивающих восприятие разнообразных по своей природе сигналов (различные медиаторы, ионы, гормоны, ростовые факторы). При этом осуществляется ассоциация сигналов, приходящих по разным путям. Сеть белок-белковых взаимодействий (молекулярный интерактом синапса), ядром которой выступают макрокомплексы НМДА-рецепторов, обеспечивает прием, определение новизны, обработку, принятие решения и выбор реакции на приходящий на синапс сигнал. То есть, по существу, эта многоуровневая молекулярная машина осуществляет базовые функции, лежащие в основе когнитивности.

В работе использованы материалы, полученные при выполнении базового проекта фундаментальных исследований РАН IV.35.1.5, грантов РФФИ 15-29-04875-офи_м и 17-04-01440-а.

Литература

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

2. *Kjelstrup K.B., Solstad T., Brun V.H., Hafting T., Leutgeb S., Witter M.P., Moser E.I., Moser M.B.* Finite scale of spatial representation in the hippocampus // Science. 2008. V. 321, № 5885. P. 140–143.

3. *Kasai H., Fukuda M., Watanabe S., Hayashi-Takagi A., Noguchi J.* Structural dynamics of dendritic spines in memory and cognition // Trends. Neurosci. 2010. V. 33. P. 121–129.

4. *Raghuram V., Sharma Y., Kreutz M.R.* Ca(2+) sensor proteins in dendritic spines: a race for Ca(2+) // Front. Mol. Neurosci. 2012. V. 5. P. 61.

5. *Smrt R., Zhao X.* Epigenetic regulation of neuronal dendrite and dendritic spine development // Front. Biol. 2010. V. 5. P. 304–323.

6. *Chen X., Winters C., Azzam R., Li X., Galbraith J.A., Leapman R.D., Reese T.S.* Organization of the core structure of the postsynaptic density // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. V. 105. P. 4453–4458.

7. *Tsunoda S., Sierralta J., Sun Y., Bodner R., Suzuki E., Becker A., Socolich M., Zuker C.S.* A multivalent PDZ-domain protein assembles signalling complexes in a G-protein-coupled cascade // Nature. 1997. V. 388. P. 243–249.

8. *Collins M.O., Husi H., Yu L., Brandon J.M., Anderson C.N., Blackstock W.P., Choudhary J.S., Grant S.G.* Molecular characterization and comparison of the components and multiprotein complexes in the postsynaptic proteome // J. Neurochem. 2006. Suppl. 1. P. 16–23.

9. *Kunishima N., Shimada Y., Tsuji Y., Sato T., Yamamoto M., Kumasaka T., Nakanishi S., Jingami H., Morikawa K.* Structural basis of glutamate recognition by a dimeric metabotropic glutamate receptor // Nature. 2000. V. 407, № 6807. P. 971–977.

10. *Collingridge G.L., Kehl S.J., McLennan H.* Excitatory amino acids in synaptic transmission in the Schaffer collateral-commissural pathway of the rat hippocampus // J. Physiol. 1983. V. 334. P. 33–46.

11. *Moloney M.G.* Excitatory amino acids // PLoS One. 2002. V. 19. P. 597–616.

12. *Lau C.G., Zukin R.S.* NMDA receptor trafficking in synaptic plasticity and neuropsychiatric disorders // Nature Rev. Neurosci. 2007. V. 8, № 6. P. 413–426.

13. *Traynelis S.F., Wollmuth L.P., McBain C.J., Menniti F.S., Vance K.M., Ogden K.K., Hansen K.B., Yuan H., Myers S.J., Dingledine R.* Glutamate receptor ion channels: structure, regulation, and function // Pharmacol. Rev. 2010. V. 62, № 3. P. 405–496.

14. *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, № 4/3. С. 1205–1218.

15. *Bochet P., Rossier J.* Molecular biology of excitatory amino acid receptors: subtypes and subunits // EXS. 1993. V. 63. P. 224–233.

16. *Luján R., Roberts J.D., Shigemoto R., Ohishi H., Somogyi P.* Differential plasma membrane distribution of metabotropic glutamate receptors mGluR1 alpha, mGluR2 and mGluR5, relative to neurotransmitter release sites // J. Chem. Neuroanat. 1997. V. 13, № 4. P. 219–241.

17. *Shiraishi-Yamaguchi Y., Sato Y., Sakai R., Mizutani A., Knöpfel T., Mori N., Mikoshiba K., Furuichi T.* Interaction of Cupidin/Homer2 with two actin cytoskeletal regulators, Cdc42 small GTPase and Drebrin, in dendritic spines // BMC Neurosci. 2009. V. 10. P. 25.

18. *Arévalo J.C., Pereira D.B., Yano H., Teng K.K., Chao M.V.* Identification of a switch in neurotrophin signal-

ing by selective tyrosine phosphorylation // J. Biol. Chem. 2006. V. 281, № 2. P. 1001–1007.

19. *Arévalo J.C., Yano H., Teng K.K., Chao M.V.* A unique pathway for sustained neurotrophin signaling through an ankyrin-rich membrane-spanning protein // EMBO J. 2004. V. 23, № 12. P. 2358–2368.

20. *Weinshank R.L., Adham N., Macchi M., Olsen M.A., Branchek T.A., Hartig P.R.* Molecular cloning and characterization of a high affinity dopamine receptor (D1 beta) and its pseudogene // J. Biol. Chem. 1991. V. 266, № 33. P. 22427–22435.

21. *Medin T., Owe S.G., Rinholm J.E., Larsson M., Sagvolden T., Storm-Mathisen J., Bergersen L.H.* Dopamine D5 receptors are localized at asymmetric synapses in the rat hippocampus // Neuroscience. 2011. V. 192. P. 164–171.

22. *Lemon N., Manahan-Vaughan D.* Dopamine D1/D5 receptors gate the acquisition of novel information through hippocampal long-term potentiation and long-term depression // J. Neurosci. 2006. V. 26, № 29. P. 7723–7729.

23. *Li S., Cullen W.K., Anwyl R., Rowan M.J.* Dopamine-dependent facilitation of LTP induction in hippocampal CA1 by exposure to spatial novelty // Nat. Neurosci. 2003. V. 6, № 5. P. 526–531.

24. *Newpher T.M., Ehlers M.D.* Glutamate receptor dynamics in dendritic microdomains // Neuron. 2008. V. 58, № 4. P. 472–497.

25. *Petrini E.M., Lu J., Cognet L., Lounis B., Ehlers M.D., Choquet D.* Endocytic trafficking and recycling maintain a pool of mobile surface AMPA receptors required for synaptic potentiation // Neuron. 2009. V. 63, № 1. P. 92–105.

26. *Neyman S., Manahan-Vaughan D.* Metabotropic glutamate receptor 1 (mGluR1) and 5 (mGluR5) regulate late phases of LTP and LTD in the hippocampal CA1 region in vitro // Eur. J. Neurosci. 2008. V. 27, № 6. P. 1345–1352.

27. *Bikbaev A., Neyman S., Ngomba R.T., Conn P.J., Nicoletti F., Manahan-Vaughan D.* MGluR5 mediates the interaction between late-LTP, network activity, and learning // PLoS One. 2008. V. 3, № 5. Art. e2155.

28. *Chowdhury S., Shepherd J.D., Okuno H., Lyford G., Petralia R.S., Plath N., Kuhl D., Huganir R.L., Worley P.F.* Arc/Arg3.1 interacts with the endocytic machinery to regulate AMPA receptor trafficking // Neuron. 2006. V. 52, № 3. P. 445–459.

29. *Малахин И.А., Проскура А.Л., Запара Т.А., Ратушняк А.С.* Влияние сборки транспортных везикул на процессы сохранения эффективности синаптической передачи // Вестник НГУ. 2012. Т. 10, № 4. С. 14–20.

30. *Mockett B.G., Guévremont D., Williams J.M., Abraham W.C.* Dopamine D1/D5 receptor activation reverses NMDA receptor-dependent long-term depression in rat hippocampus // J. Neurosci. 2007. V. 27, № 11. P. 2918–2926.

Задержки речевого развития как показатель когнитивных нарушений

Т.М. Радаева[1], К.А. Маркелова[1], И.А. Трушина[1], И.А. Логинова[3], М.В. Бак[2], Ю.И. Семерикова[2]

[1]Нижегородская государственная медицинская академия
radaeva50@mail.ru
[2]ГБУЗ НО НОДКБ
[3]Медицинский центр «ЭЛЕГРА»

Речь является важнейшей когнитивной функцией и одной из основных характеристик формирования высшей психической деятельности у детей, их социализации, адаптации в коллективе, возможности обучения [1]. В настоящее время частота встречаемости когнитивных нарушений у детей существенно возросла [2]. Как правило, дети с задержкой речевого развития (ЗРР) страдают и поведенческими нарушениями, в частности расстройствами коммуникации, внимания, гипервозбудимостью. Однако нет единого алгоритма выявления речевых нарушений и достоверных статистических данных о распространенности расстройств речи у детей в РФ [2]. Вероятно, это связано с недостаточным контролем детей группы риска по развитию нарушений речи и с несвоевременным обращением родителей к специалистам.

Для ранней и точной диагностики расстройств речи необходимо помнить закономерности нормального речевого развития [3]. Формирование речи происходит в два этапа – доречевой период (первый год жизни) и речевой период (10 мес. – 7 лет). В частности, в нашей работе анализируется развитие речи и выявление ее расстройств у категории пациентов, находящихся в речевом периоде формирования речи. Речевой период включает в себя несколько этапов. Первый, или инициальный, этап (10–18 мес.) заключается в переходе лепета в слоги, появлении односложных предложений, понимании простых инструкций и наборе запаса из 40–50 слов. Второй (ранний, 18–30 мес. жизни) – в нарастании запаса слов до 200–300, появлении многословных предложений. На третьем этапе (поздний, 2,5 года – 6 лет) ребенок способен строить сложные фразы, используя все основные части речи, умеет составить рассказ (пересказ) с развитием сюжета, постепенно исчезают возрастные недостатки произношения звуков и слов. Под задержкой развития речи следует рассматривать отставание в речи от нормы развития ребенка до 4 лет. Такое состояние относят к группе специфических расстройств речи и языка (F80) по МКБ-10, для которых характерно нарушение приобретения языковых навыков на ранних стадиях развития и наличие смежных проблем в виде нарушения межличностных отношений, эмоциональных и поведенческих расстройств.

В данной статье представлены результаты изучения клинических данных пациентов дошкольного возраста с сохраненным зрением и слухом, имеющих задержку речевого развития (преимущественно моторной составляющей речи), проанализированы вероятные этиологические факторы: наследственности, антенатального и перинатального риска (течение беременности и родов), произведена оценка нервно-психического развития детей с ЗРР на первом году жизни и катамнестически.

Цель исследования – анализ проблемы ранней диагностики задержек речевого развития у детей и необходимости воспитания у родителей настороженности по поводу расстройств речи в раннем возрасте.

Материалы и методы

Рассмотрены клинические данные 73 пациентов с задержкой речевого развития и синдромом гипервозбудимости. Произведена оценка анте- и перинатальных факторов (беременность и роды), генеалогического анамнеза, анамнеза жизни и заболевания.

Результат и обсуждение

Проблемы когнитивных нарушений у детей зачастую связаны с перинатальными нарушениями различного генеза и отягощенным генеалогическим анамнезом. В группе исследуемых нами детей отягощенную наследственность имели 47,95 % детей. В анамнезе 93,15 % детей – беременность с осложнениями (61,64 % – хроническая внутриутробная гипоксия плода, 42,47 % – угроза прерывания, 21,92 % – анемия); 84,9 % – роды с осложнениями (51,61 % – медикаментозная и механическая стимуляция; 16,13 % – раннее отхождение околоплодных вод; 12,90 % – преждевременное отхождение околоплодных вод), при этом в 23,29 % случаев выполнено экстренное кесарево сечение.

С рождения у 73,97 % детей поставлен диагноз перинатального поражения центральной нервной системы (ПЭП), преимущественно гипоксически-ишемического генеза, задержки двигательного развития легкой и умеренной степени, по поводу чего осуществлялись эффективные реабилитационные мероприятия.

По результатам нашего исследования развитие детей с ЗРР на первом году соответствует возрастным нормам. В среднем в моторном развитии такие дети держали головку к 2,9 мес.; садились в 6,5 мес.; вставали с 8,3 мес.; ходили с 11,5 мес., т. е. моторные навыки к 1-му году жизни были сформированы.

Большинство детей вовремя демонстрируют элементы предречевого развития: гуканье, гуление, первые слова говорят с 13,5 мес. Однако начиная со 2-го года жизни наблюдается задержка в дальнейшем речевом развитии: набор слов не по-

полняется, нарушена артикуляция, построение предложений затруднено или невозможно. В среднем предложения для таких детей доступны не ранее чем с 2,5 года.

Для формирования речи определяющим также является период от первого года жизни до 3–5 лет. Выявление отклонений в речевом развитии ребенка должно быть причиной безотлагательного обращения родителей к специалистам (педиатру, детскому неврологу, логопеду) [4]. Однако в настоящее время наблюдается тенденция поздней диагностики речевых расстройств. В частности, средний возраст ребенка на момент осмотра специалистом по поводу нарушения речи, поведения или сна по данным нашего исследования приходится на 3,5 года. Из числа отобранных нами детей – 50 мальчиков (68,49 %) и 23 девочки (31,51 %). Причем причиной обращения к врачу часто становится не задержка развития речи (57,5 % жалоб), а повышенная возбудимость – 63 % исследуемых, нарушения сна – 27 %, агрессивность и нарушения поведения – 13,6 %, дневные и ночные страхи. В частности, нарушение поведения, гипервозбудимость и агрессивность больше свойственна мальчикам (69 % случаев). Стоит отметить, что нередко в связи с задержкой речевого развития у детей нарушается темп речи, т. е. имеет место тахилалия, которая клинически напоминает заикание.

В подтверждение данного тезиса рассмотрим клинический случай. Пациент В., 3 года 6 мес. Пришел на консультацию к неврологу с жалобами на задержку речи, заикание, повышенную возбудимость, страхи. Держит головку с 2,5 мес., садится с 6 мес., встает с 8 мес., ходит с 11 мес. Первые предложения – в возрасте 2,5 лет. Дизартрия, дислалия. С 3 лет – заикание. Из перенесенных заболеваний: ПЭП, пирамидная недостаточность. Проводился курс ФТЛ, лекарственной терапии. При осмотре: сознание ясное, контактирует охотно, гипервозбудим, инструкции выполняет. ЧМН – без патологии. Высшие психические функции: дизартрия, дислалия, диспраксия (моторная неловкость), внимание и память в пределах возрастной нормы, гнозис без патологии. Проведенные исследования: ЭЭГ от 2014 года – умеренные диффузные изменения БЭА головного мозга, эпиприступы и их паттерны не зарегистрированы.

Эти данные говорят о том, что пристальное внимание за развитием ребенка, особенно группы высокого риска развития речевых расстройств, должно быть не только в неонатальном периоде и на 1-м году жизни, но и в последующие годы периода развития речи (2–5 лет).

Заключение

Речь является обязательным компонентом формирования всех когнитивных функций. Наличие речевых и поведенческих расстройств существенно влияет на общее развитие ребенка, нарушает его коммуникацию с окружающим миром, ограничивает количество получаемой через общение информации, нарушает гармоничность формирования межличностных отношений, негативно изменяет эмоциональную сферу ребенка [5]. Соответственно, это приводит к социальной дезадаптации детей с задержкой речевого и поведенческого развития в учреждениях дошкольного образования, а в последующем – в системе школьного образования. Необходимо учитывать, что на первом году жизни дети с перинатальной патологией и дети группы риска по развитию в дальнейшем речевых и поведенческих расстройств могут соответствовать средним возрастным нормам. Однако с 2 лет у данной группы начинают проявляться признаки задержки речевого и поведенческого развития. Этот факт объясняется более поздним формированием систем речевого и поведенческого развития в онтогенезе. Дефицит контроля специалистов и родителей в данный возрастной период препятствует раннему выявлению расстройств речи и их ранней коррекции. Основными причинами обращения родителей к специалистам (неврологам, педиатрам, логопедам) является нарушение поведения в виде гипервозбудимости, агрессивности, боязни чужих людей, нарушения сна. Указанные нарушения поведения у данной группы детей также объясняются задержкой речевого развития как показателя нарушения нормального течения онтогенеза.

Дети с перинатальной патологией нуждаются в длительном ежеквартальном наблюдении: на первом году жизни преимущественно за развитием двигательной сферы, на 2-м году – за развитием речи, на 3-м году следует обращать особое внимание на поведение ребенка. В то же время ранняя диагностика и коррекция когнитивных нарушений у детей невозможна без активного взаимодействия между родителями, педиатрами, неврологами, логопедами и психологами.

Литература

1. *Заваденко Н.Н., Щедеркина И.О., Заваденко А.Н., Козлова Е.В.* Отставание развития речи в практике педиатра и детского невролога // Вопросы современной педиатрии. 2015. Т. 14, № 1. С. 132–137.

2. *Белоусова М.В., Уткузова М.А., Гамирова Р.Г., Прусаков В.Ф.* Перинатальные факторы в генезе речевых нарушений у детей // Практическая медицина. 2013. № 1 (66). С. 11–120.

3. *Дашина М.Г., Акопян Т.А., Павлов Г.А., Кочеткова Е.П., Тимошникова Н.Н.* Проблемы экспертной оценки нарушений речи у детей раннего и дошкольного возраста при проведении медико-социальной экспертизы // Медико-социальная экспертиза и реабилитация. 2014. № 2. С. 54–57.

4. *Заваденко Н.Н., Суворинова Н.Ю.* Задержки развития речи у детей: причины, диагностика и лечение // РМЖ. 2016. № 6. С. 362–366.

5. *Чутко Л.С., Ливинская А.М.* Специфические расстройства речевого развития у детей : учебно-методическое пособие. СПб., 2006. С. 4.

Реализация прогностической функции внутринейронными молекулярными сигнальными комплексами

А.С. Ратушняк[1], Т.А. Запара[1], А.Л. Проскура[1], Е.Д. Сорокоумов[1,2]

[1]Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск
ratush@mail.ru
[2]Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск
sorokoumov@bionet.nsc.ru

Введение

Главным свойством всех известных живых организмов является уменьшение энтропии системы на основе прогностики.

Понятие отрицательной энтропии было введено Э. Шредингером в 1943 г. Им была сформулирована концепция о роли информационных процессов в биологических системах. В основе этой концепции лежат представления, что биологическим системам для существования в окружающей среде необходимо извлекать из нее отрицательную энтропию. Это позволяет компенсировать внутренние энтропийные процессы и тормозить, таким образом, свое движение к термодинамическому равновесию, т. е. потере жизнеспособности [1].

Термин «негэнтропия» применительно к отрицательной энтропии ввел Л. Бриллюэн. Он связал процесс получения информации и уменьшения негэнтропии, сформулировал и ввел в теорию информации негэнтропийный принцип, согласно которому «информация представляет собой отрицательный вклад в энтропию». Откуда следует, что «негэнтропия эквивалентна информации» [2].

Количество информации, равное разности между начальной (до получения сообщения) и конечной (после получения сообщения) энтропией, является мерой негэнтропии. С этим понятием в синергетической теории информации связывают отражение «чего-либо» через «что-либо» [3].

Однако во всех этих определениях и концепциях, по сути, не рассматривается вопрос о функции информационных процессов в системах. Фактически не учитывается, что информация, получаемая и фиксируемая в биологических системах, используется ими для создания прогноза будущего состояния среды и планирования поведения, стабилизирующего или увеличивающего негэнтропию.

Такие представления о жизни в области теоретической физики, естественно, должны подкрепляться теоретико-экспериментальными данными об организации биологических систем и базироваться на представлениях об их эволюции [1–6]. Без понимания возможных механизмов и путей формирования подобных молекулярных устройств, обладающих негэнтропийными свойствами, попытки их моделирования не представляются перспективными.

Возможные предпосылки и пути формирования биологических негэнтропийных систем

Анализ физических принципов работы существующих биологических систем обычно ориентирован на организменный, реже на клеточный и супрамолекулярный уровни [7]. При этом молекулярная машина клетки, формировавшаяся по существующим представлениям в течение 3,5–4 миллиарда лет, по сложности не представляется доступной для имитационного моделирования. В то же время понятно, что существующие сейчас клетки являются результатом последовательного усложнения достаточно простых молекулярных систем – протоклеток (микробиот). Главное свойство, которым должны были обладать эти простые системы для своего существования, сводится к возможности баланса между затратами энергии на получение информации и ее использованием для приобретения негэнтропии. То есть эти молекулярные комплексы должны были быть достаточно простыми для возможности их спонтанного формирования с некоторым избытком (запасом) негэнтропии. В принципе, они могли состоять из ограниченного числа функциональных элементов – рецепторов и эффекторов. При этом один из рецептор-эффекторных комплексов мог выполнять функции реактивной системы, т. е. осуществлять ответ на внешнее воздействие. Другие молекулы-рецепторы могли обладать свойством ассоциативного объединения с реактивной системой, но при этом иметь более высокую чувствительность или обладать селективностью к детектируемым ими факторам. Закрепление взаимосвязи двух рецепторных молекул является по существу элементом запоминания информации о значимости этих факторов. Такая вновь возникшая супрамолекулярная конструкция, в которой более слабый сигнал, приходящий раньше более сильного, вызывает сходную с ним реакцию, по сути, приобретала прогностические свойства. При повторении подобной комбинации внешних сигналов реакция системы, возникающая после срабатывания более чувствительного рецептора, приводила к избеганию потери упорядоченности (с затратой энергии) либо приобретению дополнительной энергии (например, поглощением энергоемких продуктов или слиянием с себе подобными). Системы с такими свойствами оказывались более устойчивыми, селектировались обратными связями со средой и

постепенно накапливались. Таким образом могли возникать негэнтропийные автономные агенты – простые молекулярные конструкции, обладающие свойствами накапливать негэнтропию с использованием приобретенной информации. Слияние таких агентов увеличивало количество рецептируемых факторов (сигналов) и повышало, таким образом, негэнтропию системы, ее устойчивость в среде. Системы, в которых множество таких агентов пространственно распределялись на внешние (с рецепторами на поверхности) и внутренние, приобретали новое качество. Происходила стабилизация внутренней структуры и последующее формирование систем ее воспроизведения с заменой простого дробления на копирование сформировавшейся конструкции. То есть постепенно могла формироваться иерархическая архитектура, приведшая в результате к возникновению протоклеток. Но при этом базой этих молекулярных конструкций остаются достаточно простые негэнтропийные автономные агенты.

Молекулярные конструкции с элементами прогностических функций

Для понимания совокупности процессов, приведших в итоге к формированию известных нам клеток и многоклеточных организмов, необходимо знание о молекулярной организации, лежащей в основе всех этих систем, – о молекулярных негэнтропийных агентах. Ориентируясь на естественно-научные представления о возникновении жизни, можно предположить, что такие молекулярные конструкции для их спонтанного формирования должны быть предельно простыми. Только в этом случае вероятность их возникновения достаточно велика. Понятно, что при этом они должны были обладать тем основным свойством, которое позволяло бы им избежать скорого энтропийного разрушения. Таким свойством является наличие возможности прогноза факторов, разрушающих или укрепляющих их целостность, и соответствующей реакции на эти воздействия. Понятно, что подобные молекулярные конструкции не могут успешно функционировать в существующей сейчас среде, с большим количеством биологических систем, способных к их поглощению. Поэтому для осуществления анализа таких супрамолекулярных конструкций можно попытаться воспроизвести их экспериментальным путем. Предпринимаемые попытки осуществления этого пока не привели к значимым результатам (например, [8]). Вторым вариантом анализа таких молекулярных систем может быть поиск подобных блоков в существующих сейчас клетках. Наиболее перспективными при этом кажутся клетки, специализирующиеся на осуществлении функции обработки информации, обучения, прогностики и управления, – нейроны. При этом главным и достаточно простым элементом в этих клетках являются синаптические контакты, представляющие комплекс рецепторных и эффекторных структур. Ранее выполненные нами работы по формированию молекулярного интерактома синапса в значительной степени подтверждают целесообразность такого подхода [9, 10]. В молекулярных ансамблях синапсов нейронов прослеживается достаточно много элементов, которые могут претендовать на роль базовых негэнтропийных блоков. Одной из таких молекулярных конструкций является рецептор – эффекторный комплекс NMDA (N-метил-D-аспартат). В молекулах, составляющих этот комплекс, присутствуют участки, выполняющие роль рецепторов глутамата, глицина, APV (R-2-амино-5-фосфонопентаноат), полиаминов и др. Эффектором в комплексе можно считать ионный канал. Кроме того, присутствуют структурные элементы, выполняющие функции модуляторов межрецепторной и рецептор-эффекторной взаимосвязи (гликозилирования, связывания протонов, блокировки Mg^{2+}-связывания цинка Zn^{2+} и др.). Функции объединения в одном молекулярном ансамбле таких элементов до конца не ясны. Можно предположить, что конвергенция нескольких сигналов, приводящая к реакции на их комбинацию, может при ассоциативной фиксации продуктивных ответов формировать прогностический комплекс. Такой комплекс можно условно рассматривать как один из возможных вариантов первичных архимолекулярных нэгентропийных элементов живых систем. Детальный биоинформационный анализ подобных молекулярных ансамблей, сопрягающих несколько информационных каналов с комбинацией рецептор-эффекторных функций, вероятно, позволит выявить такие негэнтропийные элементы и структурно-функциональную архитектуру их объединения в клетке. Вероятно, это позволит продвинуться в создании имитационных моделей биологических информационных систем на основе базовых элементов с достаточно простой функцией – сохранение своего состояния на основе прогностики. Такая прогностика может осуществляться на базе ассоциативного обучения при реактивном или активном взаимодействии такого элемента со средой, т. е. при действии обратных связей. Для последующего конструирования из таких базовых элементов моделей систем более высокого уровня можно использовать знания о конструкции внутриклеточных сигнальных систем. Прототипом таких моделей могут быть молекулярные машины в клетках, специализирующихся на прогнозировании и управлении – нейронах [11–14].

Заключение

Понимание механизмов функционирования и путей эволюционного формирования молекулярных устройств, обладающих негэнтропийными свойствами, позволит продвинуться в области их концептуального анализа и имитационного моделирования. Создание моделей биологических информационных систем из простых автономных, негэнтропийных, ассоциативно обучающихся, прогностических агентов и их объединения на базе эволюционных законов позволит конструировать биологически инспирированные аппаратно-про-

граммные комплексы. Функции таких комплексов могут не ограничиваться задачами, обусловленными долгосрочным прогнозированием, но могут, вероятно, обладать и другими высшими когнитивными свойствами, связанными с обучением, памятью, вниманием, планированием и другими близкими к их прототипам, вплоть до социальных. Полученные знания и разрабатываемые технологии применимы для профилактики, диагностики, коррекции нейроиндуцированных патологий и доклинического скрининга фармакологически перспективных соединений.

В работе использованы материалы, полученные при выполнении базового проекта фундаментальных исследований РАН IV.35.1.5, грантов РФФИ 15-29-04875-офи_м и 17-04-01440-а.

Литература

1. *Schrödinger E.* What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell. Cambridge : University Press, 1944. P. 91.

2. *Brillouin L.* Scientific Uncertainty, and Information. Academic Press, 1964. P. 178.

3. *Кондаков Н.И.* Логический словарь-справочник. М. : Наука, 1976. С. 331.

4. *Лийв Э.Х.* Инфодинамика. Обобщенная энтропия и негэнтропия. Таллинн, 1998. 200 с.

5. *Red'ko V.G.* Epistemological foundations of investigation of cognitive evolution // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2016. V. 18. P. 105–115.

6. *Витяев Е.Е.* Целенаправленность как принцип работы мозга // ВЖГиС. 2014. Т. 18, № 4/3. С. 1172–1183.

7. *Крушинский А.* Плата за решение задачи: биофизические предпосылки и возможные эволюционные последствия // Российский журнал когнитивной науки. 2015. Т. 2, № 1. С. 52–61.

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. *Проскура А.Л., Вечкапова С.О., Запара Т.А.* Реконструкция молекулярного интерактома в системе глутаматных синапсов // ВЖГиС. 2014. Т. 18, № 4/2. С. 1205–1218.

10. *Vishnevsky O.V., Putinsev N.I., Zapara T.A., Ratushnyak A.S.* Analysis of the cognitive properties of neural systems based on biofeedback // Russian Journal of Genetics: Applied Research. 2015. V. 5, № 6. P. 609–615.

11. *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.

12. *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.

13. *Collins M.O., Husi H., Yu L., Brandon J.M.* [*et al.*] Molecular characterization and comparison of the components and multiprotein complexes in the postsynaptic proteome // J. Neurochem. 2006. V. 97. P. 16–23.

14. *Ramírez O.A., Couve A.* The endoplasmic reticulum and protein trafficking in dendrites and axons // Trends. Cell. Biol. 2011. V. 21. P. 219–227.

Нелинейная динамика погодно-климатических факторов и состояние параметров организма

С.Н. Русак, О.Е. Филатова, Л.М. Бикмухаметова

Сургутский государственный университет
svetlana_01.59@mail.ru

Антропоэкологические параметры окружающей среды, и в первую очередь климатоэкологическое состояние конкретной территории, обуславливают различные аспекты жизнедеятельности человека. Наблюдаемое во второй половине XX столетия глобальное повышение среднегодовой температуры приземного воздуха вызвало возрастающий интерес к изучению климатических изменений [4]. Соотношение естественных и антропогенных факторов в наблюдаемом потеплении пока остается предметом научных споров [2–4]. Причем это становится актуальным не только для стран Европы (ожидающих резкого похолодания), но и для РФ как высокоширотного региона.

Применение различных подходов при анализе и оценке долговременной динамики погодно-климатических параметров, особенно если это метеорологические факторы, такие как температура T или атмосферное давление P, относительная влажность воздуха R, предполагает математическую процедуру по стандартизованному алгоритму в виде расчета интегральных индексов, определения тренда, установления причинно-следственной зависимости, логистического анализа, что влияет на параметры организма населения Севера РФ (у нас ХМАО-Югра).

При изучении устойчивости динамической системы, исходя из феноменологических наблюдений, строится математическая модель и затем производится ее исследование. Вместе с тем динамика поведения биологических систем может быть очень разнообразной. В различные моменты времени она может описываться в виде различных разностных или дифференциальных уравнений, которые могут значительно изменять размерность фазового пространства [1, 5–8].

Известно, что открытые и нелинейные системы, к которым относится и климатическая система, способны к самоорганизации. При этом открытость является необходимым, но не достаточным условием для самоорганизации. Природная система, являясь динамической, самоорганизующейся, нестабильной и плохо прогнозируемой, требует совершенно отличного от классического системного анализа инструментария для исследования процессов жизнедеятельности и эволюционирования открытых самоорганизующихся систем [1–4, 9–11].

В работах, посвященных анализу климатических временных рядов методами нелинейной динамики, показано, что для временных рядов некоторых климатических характеристик (скорость ветра, атмосферное давление, температура и др.) могут быть найдены «аттракторы» низкой размерности [1–4].

Методы, разработанные в рамках теории хаоса – самоорганизации (ТХС) и успешно применяемые в практике научных исследований, в том числе при анализе характера динамики исследуемых параметров в m-мерном фазовом пространстве, позволили получить фазовые портреты квазиаттракторов (КА) вектора состояния метеопараметров в 3-мерном пространстве, координатами которого являлись показатели температуры (T), давления (P) и влажности (R) воздуха [5–10].

Объектом исследования являлась динамика погодно-климатических условий на примере г. Сургута. Обработка временных рядов метеорологических показателей (температура, атмосферное давление, влажность атмосферного воздуха), исследование характера динамики метеопараметров производились как с позиций классической математической статистики, так и методом идентификации параметров метеосостояний КА в фазовом пространстве (ФП) признаков в рамках ТХС [1, 5–10].

Расчеты показали, что динамика погодных условий по трем метеопараметрам (температура, атмосферное давление, влажность атмосферного воздуха) за многолетний период наблюдений сильно различалась, т. е. картина схожести зимних, весенних или летних сезонов за этот промежуток времени практически отсутствовала – каждый год уникален и имел разный вектор этих изменений [5, 7].

В целом величина объема суммарных КА метеопараметров среды в разные сезоны года на примере территории г. Сургута значительно варьировалась, диапазон их изменения демонстрировал высокие сезонные контрасты, а временная динамика характеризовала хаотичность поведения системы в целом (рис. 1). Так, за период 1991–2009 гг. в январе эти изменения находились в пределах значений $V_g = 0{,}40 \cdot 10^4 - 3{,}39 \cdot 10^4$ у. е., в апреле – $V_g = 0{,}82 \cdot 10^4 - 7{,}72 \cdot 10^4$ у. е.; в июле – $V_g = 0{,}24 \cdot 10^4 - 2{,}88 \cdot 10^4$ у. е., в октябре – $V_g = 0{,}67 \cdot 10^4 - 2{,}73 \cdot 10^4$ у. е.

Если поведение ДС предельно стохастично, то фазовая траектория равномерно занимает объем фазового пространства. В случае детерминированного хаоса траектория заполняет некоторую ограниченную область фазового пространства, что наглядно иллюстрируют графические портреты квазиаттракторов метеопараметров для разных периодов исследования в условиях г. Сургута (рис. 2). Размерность квазиаттрактора (V_{ij}) в данном случае является мерой динамической хаотич-

ности процесса: чем она меньше, тем менее сложным и более предсказуемым является поведение системы [5–9].

Рис. 1. Динамика значений объемов квазиаттрактора за период 1991–2009 гг. на примере весеннего и осеннего сезонов года для г. Сургута (линия с маркером на графике – осенний период; без маркера – весенний). По оси *OX* – период наблюдений; по оси *OY* – объемы ($V_g \cdot 10^4$ у. е.) квазиаттракторов метеопараметров

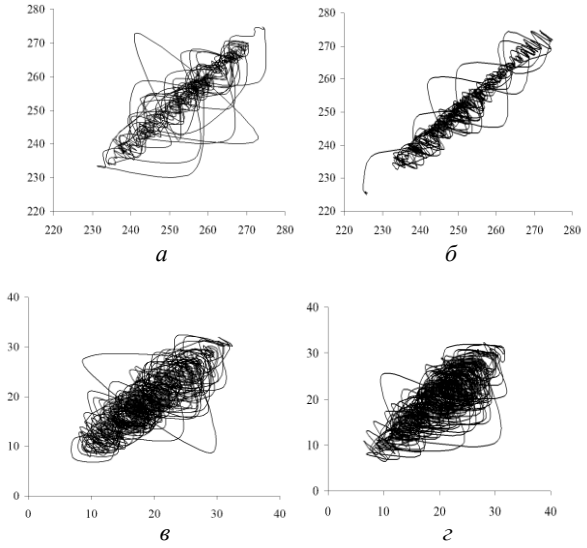


Рис. 2. Фазовые портреты, характеризующие ряды температурных величин в г. Сургуте в многолетней динамике на примере зимнего сезона: январь 2001–2005 гг. (*а*); январь 2006–2010 гг. (*б*), и летнего сезона: июль 2001–2005 гг. (*в*); июль 2006–2010 гг. (*г*). По оси *OX* – значения температуры T_n (К), по оси *OY* – значения T_{n-1} (К); т. е. фазовые траектории построены в одном и том же масштабе – с шагом в один день

Происходит кардинальная перестройка фазового портрета системы, когда обе устойчивые точки теряют свою устойчивость и в системе возникает квазиаттрактор сложной структуры. Полученные данные согласуются с оценками усиления хаоса температур в последние годы, в то время как для большинства более ранних временных рядов (90-е гг.) характерна более устойчивая динамика [2–4, 8].

Подход использовался нами при анализе временных рядов погодно-климатических показателей. При разной хаотичности x_i параметры жизнедеятельности (заболеваемости) были прямо пропорциональны объемам квазиаттракторов. Хаос метеопараметров порождает и хаос физиологических функций организма человека на Севере.

Литература

1. *Еськов В.М., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Вохмина Ю.В.* Формализация эффекта «повторение без повторения» Н.А. Бернштейна // Биофизика. 2017. Т. 62, № 1. С. 168–176.

2. *Капица С.П.* Синергетика и прогнозы будущего / С.П. Капица, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий // Синергетика и прогнозы будущего. Изд. 3. М. : Наука, 2003. 288 с.

3. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. М. : УРСС, 2003. 312 с.

4. *Ревич Б.А., Малеев В.В.* Изменения климата и здоровье населения России: анализ ситуации и прогнозные оценки. М. : ЛЕНАНД, 2011. 208 с.

5. *Русак С.Н., Козупица Г.С., Буров И.Г., Митющенко Н.А.* Хаотическая динамика метеофакторов в условиях азиатского Севера РФ (в условиях ХМАО-Югры) // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2013. Т. 2, № 3 (4). С. 13–20.

6. *Русак С.Н., Молягов Д.И., Еськов В.В., Филатова О.Е.* Годовая динамика погодно-климатических факторов и здоровье населения ХМАО // Экология человека. 2013. № 11. С. 19–24.

7. *Русак С.Н., Филатова О.Е., Бикмухаметова Л.М., Синенко Д.В.* Квазиаттракторы погодно-климатических факторов Югры и заболеваемость населения // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2015. № 3. С. 26–34.

8. *Русак С.Н., Филатова О.Е., Горбунов Д.В., Бикмухаметова Л.М.* Динамика погодно-климатических факторов в условиях метеорологической неопределенности на примере ХМАО – Югры // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 1. С. 38–44.

9. *Русак С.Н., Молягов Д.И., Бикмухаметова Л.М., Филатова О.Е.* Биоинформационные технологии в анализе фазовых портретов погодно-климатических факторов в *m*-мерном пространстве признаков // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2014. № 3. С. 24–28.

10. *Филатова О.Е., Зинченко Ю.П., Еськов В.В., Стрельцова Т.В.* Сознательное и бессознательное в организации движений // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2016. № 3. С. 23–30.

11. *Eskov V.M., Bazhenova A.E., Vochmina U.V., Filatov M.A., Ilyashenko L.K.* N.A. Bernstein hypothesis in the Description of chaotic dynamics of involuntary movements of person // Russian Journal of Biomechanics. 2017. V. 21, № 1. P. 14–23.

Определение временных параметров транскраниальной магнитной стимуляции, задающих оптимальные характеристики работы оператора в контуре интерфейса «мозг – компьютер»

А.В. Савосенков[1], Н.А. Григорьев[1], М.В. Лукоянов[1,2], С.Ю. Гордлеева[1], А.Я. Каплан[1,3]

[1]Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2]Нижегородская государственная медицинская академия
[3]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция (рТМС) все чаще используется для изучения механизмов функционирования мозга и пластичности. Эффекты рТМС зависят от интенсивности и частоты стимуляции и представляют собой изменения корковой возбудимости, которая часто длится несколько минут после окончания [1]. В данной работе было рассмотрено воздействие ритмической транскраниальной магнитной стимуляции на возбудимость первичной сенсомоторной коры.

Методика

Исследование проходило в несколько этапов: на первом необходимо было создать 3D-модель головы испытуемого с помощью навигационной ТМС. Стандартная модель мозга соотносилась с головой испытуемого для визуализации электромагнитного поля на ее поверхности. Для этого сенсорная навигационная система (Visor 2) локализовала койл, трекер для головы и перо по специальным меткам, расставленным на них. Дальнейшим этапом исследования являлась стимуляция ТМС моторной коры и поиск зоны, топографически ответственной за сокращение мышц среднего пальца правой руки. Для стимуляции в работе был использован стимулятор «Нейро-МС/Д». Далее регистрировалось минимальное значение, при котором наблюдалось сокращение мышц [2]. Следующим шагом эксперимента являлся тест тактильной дискриминации. Проводился он на третьей фаланге среднего пальца правой и левой руки. Используя два тактильных раздражителя и изменяя расстояние между ними, совершая по десять предъявлений, мы находили границы, при которых в 100 % предъявлений испытуемый воспринимал оба эти раздражителя как один и при которых с вероятностью 100 % испытуемый различал эти раздражители [3]. Потом со сдвигом назад на 1,5–2 см от участка, выбранного на моторной коре, на сенсомоторной коре находилась зона, которую и необходимо было стимулировать. Далее проводилась ритмическая стимуляция с частотой 5 Гц, длительностью 6,5 мин (1950 импульсов) и на 110 % от порогового значения. После завершения стимуляции проводился повторный тест тактильной дискриминации, также регистрировались значения, при которых испытуемый различал или не различал тактильные раздражители. Данные, полученные с левой руки, являлись контрольными.

Результаты

В данном исследовании были задействованы пять человек (3 женщины, 2 мужчины, средний возраст (19,69 ± 1,3) лет). Все испытуемые правши. В результате проведенного исследования было выявлено, что у ряда испытуемых изменились границы тактильной дискриминации, т. е. уменьшился порог чувствительности (рис. 1–5), у других испытуемых улучшился процент правильных распознаний тактильных раздражителей (рис. 2, 3).

Рис. 1. Результаты точности теста тактильной дискриминации испытуемого 1

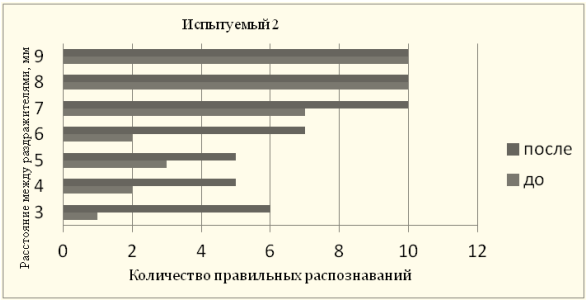


Рис. 2. Результаты точности теста тактильной дискриминации испытуемого 2

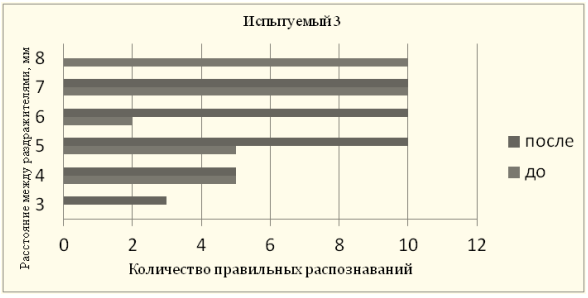


Рис. 3. Результаты точности теста тактильной дискриминации испытуемого 3

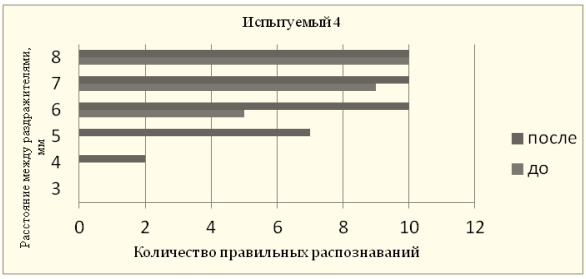


Рис. 4. Результаты точности теста тактильной дискриминации испытуемого 4

Рис. 5. Результаты точности теста тактильной дискриминации испытуемого 5

Следовательно, можно сделать вывод, что высокочастотная стимуляция (> 5 Гц) приводит к возбуждающему эффекту. Более того, продолжительность после эффекта пропорциональна продолжительности стимуляции, общему числу стимулов и кратности сессий. Физиологический эффект рТМС и длительное последействие традиционно связывается с изменением синаптической пластичности [4].

Работа выполнена при поддержке фонда РНФ (грант 15-19-20053).

Литература

1. *Pascual-Leone A., Valls-Sole J., Wassermann E.M., Hallett M.* Responses to rapid-rate transcranial magnetic stimulation of the human motor cortex // Brain. 1994. V. 117. P. 847–858.

2. *Barker A.T., Jalinous R., Freeston I.L.* Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex // The Lancet. 1985. V. 325, № 8437. P. 1106–1107.

3. *Ragert P., Becker M., Tegenthoff M., Pleger B., Dinse H.R.* Sustained increase of somatosensory cortex excitability by 5 Hz repetitive transcranial magnetic stimulation studied by paired median nerve stimulation in humans // Neurosci. Lett. 2004. V. 356. P. 91–94.

4. *Fitzgerald P.B., Fountain S., Daskalakis Z.J.* A comprehensive review of the effects of rTMS on motor cortical excitability and inhibition // Clinical Neurophysiology. 2006. V. 117, № 12. P. 2584–2596.

Нейронные механизмы индивидуальных различий приобретения новых навыков

О.Е. Сварник

Институт психологии РАН, Москва

Исследование закономерностей приобретения различных навыков уже давно демонстрирует существенную вариабельность скорости освоения разных задач. Можно предположить, что такая вариабельность обеспечивается мозговыми процессами. Было показано, что, например, испытуемые, различающиеся по успешности реализации проблемных задач, демонстрируют достоверно различающиеся паттерны активности мозга, регистрируемые с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии (например, [5]). Точные сценарии процессов, способствующих быстрому приобретению новых навыков, тем не менее, остаются неизвестными. Однако установлено несколько коррелятов успешного обучения. При этом необходимо отметить, что успешность обучения не всегда коррелирует с успешностью сохранения памяти.

В качестве одного из таких коррелятов можно выделить морфологические изменения в мозге. Например, у животных, с большими трудностями обучившихся навигации в водном лабиринте Морриса, через 24 часа после обучения обнаружилось больше синаптических контактов в гиппокампе по сравнению с более успешными животными [15], а также в большей степени наблюдались изменения уровня экспрессии молекул клеточной адгезии, вовлеченных в модификации нейронных контактов [16, 19]. Однако можно предположить, что быстрая успешность приобретения навыков обеспечивается процессами, происходящими гораздо быстрее, чем процессы модификации синаптических контактов между нейронами, которые, возможно, являются только следствием успешного обучения.

Поскольку любое научение начинается с детекции новизны или рассогласования [1], можно предположить, что в основе быстрого и успешного приобретения навыков лежат особенности активации нейронов на новизну на начальных этапах научения. Известно, что маркером процессов детекции новизны является индукция экспрессии белка Fos в нейронных группах [2].

В ряде исследований была найдена прямая корреляция между интенсивностью экспрессии Fos и успешностью научения. Zhang с соавторами [20] показали, что с возрастом увеличивается число попыток, за которые происходит научение избеганию электроболевого раздражения в затемненном отсеке (т. е. животные обучаются хуже), и в то же время меньше экспрессия Fos при данном научении (в меньшем числе нейронов обнаруживается белок Fos). В инструментальной пищедобывательной задаче было показано, что чем больше прогресс в научении (чем меньше время, потраченное на совершение 15 правильных актов) от первого дня ко второму, тем больше Fos-положительных клеток обнаруживалось в области CA1 гиппокампа после второго дня научения, охарактеризованного авторами как окончательное формирование навыка; другие области не различались [7]. Сходные корреляции были получены и для задачи импринтинга [10], и для задачи контекстуального замирания [14].

Интересные данные были получены при введении апамина – полипептида, с одной стороны, блокирующего кальций-активируемые калиевые каналы малой проводимости (SK-каналы), что приводит к большей возбудимости нейронов за счет модуляции гиперполяризации после генерации потенциала действия [17], а, с другой стороны, улучшающего научение и память [8]. Было, например, установлено, что введение апамина приводит к достоверному снижению времени приобретения навыка нажатия на педаль у мышей [13]. Кроме того, было показано in vitro, что введение апамина интенсифицирует развитие долговременной потенциации в гиппокампе [6]. Таким образом, можно предположить, что увеличение частоты активности нейронов – одно из необходимых условий увеличения скорости обучения.

Повышение частоты активности нейронов при обучении отмечалось неоднократно. Так, например, было показано, что при выработке условного оборонительного рефлекса у кроликов фоновая частота проекционных нейронов соматосенсорной коры увеличивается с обучением [4]. Также на кроликах было показано, что при формировании условного мигательного рефлекса на звук самые ранние стадии обучения (первый день, когда процент правильных реакций начинает расти) характеризуются самой высокой частотой активности нейронов области CA1 гиппокампа по сравнению с последующими днями [11]. Похожие результаты были получены при регистрации нейронной активности в гиппокампе в период формирования навыка навигации в лабиринте у крыс. Было установлено, что в целом частота активности популяции клеток области CA1 и число активных нейронов снижается, когда обстановка становится знакомой и успешность решений задачи навигации увеличивается [9]. Таким образом, можно предположить, что активность нейронов изменяется на самых ранних стадиях обучения, при введении новизны или несоответствия ожидаемого реальной ситуации – по сравнению с ситуацией выполнения устоявшегося навыка.

Поскольку формирование нового опыта начинается с попыток применить старый опыт, можно ожидать, что изменениям будут подвергаться в первую очередь те нейроны, которые уже участвовали в реализации предыдущего опыта. Дейст-

вительно, было показано, что введение новых подкрепляемых зон в круговом лабиринте у крыс, уже имеющих опыт формирования пространственных карт в данном лабиринте, приводило к изменению активности гиппокампальных нейронов, уже имеющих специфическую активность по отношению к какой-либо зоне [12].

В наших работах мы исследовали временную динамику активности нейронных популяций ретросплениальной коры крыс в процессе обучения двум последовательным пищевым навыкам: неинструментальному навыку сбора пищи на открытой арене и инструментальному навыку нажатия на педаль в инструментальной клетке. Регистрация нейронной активности производилась с первого момента помещения животного на открытую арену. После формирования первого навыка в течение нескольких дней животные помещались в инструментальную клетку, где обучались второму навыку нажатия на педаль. В обеих задачах мы обнаружили нейроны, специфически активируемые только в одном поведении, но не в другом, а также нейроны, активирующиеся при выполнении и того и другого вида поведения [18]. Для установления корреляций нейронной активности были подсчитаны частота спайковой активности и межспайковые интервалы для всех одновременно зарегистрированных нейронных пар. Мы также анализировали изменения активности нейронных популяций в процессе перехода от одной задачи к другой. Были обнаружены нейроны, демонстрирующие временное увеличение частоты спайковой активности после первого помещения животного во вторую новую задачу. В то же время синхронизированная нейронная активность, наблюдаемая при выполнении первой задачи, исчезала при помещении животного в условия второй задачи. Полученные результаты демонстрируют возможный механизм возрастающей вариабельности нейронной активности при научении для последующей селекции специфических нейронных групп. Можно предположить, что это изменение происходит на стадии рассогласования при научении, когда нейроны первоначально активируются в новом для них составе. Приведенные данные позволяют предположить, что чем больше возможных комбинаций нейронов «тестируется» при обучении (что отражается в большем числе Fos-положительных нейронов), тем быстрее может быть найдена такая нейронная группа, активность которой приводит к достижению необходимого результата или адаптивного соотношения организма со средой.

Мы также исследовали корреляции между успешностью обучения и числом Fos-положительных нейронов, детектируемых сразу после обучения, при этом животные обучались двум навыкам последовательно: инструментальному питьевому и пищевому. 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 [3]. 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 пищедобывательное поведение нажатия 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. Нами рассматривалась корреляция между числом Fos-положительных нейронов после формирования второго навыка и успешностью приобретения этого второго навыка или успешностью приобретения первого навыка. Было установлено, что число Fos-положительных нейронов не различается между группами успешных животных и неуспешных животных, если оценку проводить по второму навыку. Успешности приобретения навыков не коррелировали между собой. Однако число Fos-положительных нейронов после приобретения второго навыка оказалось достоверно больше у тех животных, которые успешно обучились первому навыку.

Таким образом, можно предположить, что успешное обучение сопровождается следующим сценарием. Увеличение частоты активности нейронов приводит к возникновению большего числа взаимодействий между нейронами. Бóльшая частота генерации потенциалов действия может отражать большее число неожиданных для нейрона взаимодействий с другими нейронами. Это приводит к формированию более сложных групп, что позднее отражается в большем числе контактов (для отдельно взятого нейрона) и большем числе нейронов, меняющих экспрессию своих генов (маркируемых по транскрипционному фактору Fos). Большее число тестируемых взаимодействий приводит к увеличению скорости нахождения необходимых комбинаций нейронов, способствующих достижению нужного результата целого организма. При этом увеличение частоты нейронов, имеющих специфические активации по отношению к уже существующим элементам опыта, является необходимым условием для «вписывания» приобретаемого нового элемента опыта в уже существующую структуру опыта. Индивидуальные различия в скорости приобретения новых навыков могут, таким образом, зависеть от реактиваций уже существующего у индивида опыта.

Работа выполнена по теме ФАНО РФ (0159-2017-0009) в рамках исследовательской программы ведущей научной школы РФ (НШ-9808.2016.6).

Литература

1. *Александров Ю.И.* Научение и память: традиционный и системный подходы // Журнал высшей нервной деятельности. 2005. Т. 55, № 6. С. 842–860.

2. *Анохин К.В.* Молекулярные сценарии консолидации долговременной памяти // Журнал высшей нервной деятельности. 1997. Т. 47 (2). С. 261–279.

3. *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.

4. *Швырков В.Б.* Сравнительная характеристика опережающего и безусловного возбуждений в соматосензорной коре кролика при выработке условного оборонительного рефлекса // Журнал высшей нервной деятельности. 1969. Т. 19, № 1. С. 3–9.

5. *Cazalis F., Valabrègue R., Pélégrini-Issac M., Asloun S., Robbins T.W., Granon S.* Individual differences in prefrontal cortical activation on the Tower of London planning task: implication for effortful processing // Eur. J. Neurosci. 2003. V. 17 (10). P. 2219–2225.

6. *Behnisch T., Reymann K.G.* Inhibition of apamin-sensitive calcium dependent potassium channels facilitate the induction of long-term potentiation in the CA1 region of rat hippocampus in vitro // Neurosci. Lett. 1998. V. 253 (2). P. 91-4.

7. *Bertaina-Anglade V., Tramu G., Destrade C.* Differential learning-stage dependent patterns of c-Fos protein expression in brain regions during the acquisition and memory consolidation of an operant task in mice // Eur. J. Neurosci. 2000. V. 12. P. 3803–3812.

8. *Heurteaux C., Messier C., Destrade C., Lazdunski M.* Memory processing and apamin induce immediate early gene expression in mouse brain // Mol. Brain. Res. 1993. V. 3. P. 17–22.

9. *Karlsson M.P., Frank L.M.* Network Dynamics Underlying the Formation of Sparse, Informative Representations in the Hippocampus // J. Neurosci. 2008. V. 28 (52). P. 14271–14281.

10. *McCabe B.J., Horn G.* Learning-related changes in Fos-like immunoreactivity inthe chick forebrain after imprinting // PNAS. 1994. V. 91. P. 11417–11421.

11. *McEchron M.D., Disterhoft J.F.* Sequence of single neuron changes in CA1 hippocampus of rabbits during acquisition of trace eyeblink conditioned responses // J. Neurophysiol. 1997. V. 78 (2). P. 1030–1044.

12. *McKenzie S., Robinson N.T., Herrera L., Churchill J.C., Eichenbaum H.* Learning causes reorganization of neuronal firing patterns to represent related experiences within a hippocampal schema // J. Neurosci. 2013. V. 33 (25). P. 10243–10256.

13. *Messier C., Mourre C., Bontempi B., Sif J., Lazdunski M., Destrade C.* Effect of apamin, a toxin that inhibits Ca(2+)-dependent K+ channels, on learning and memory processes // Brain Res. 1991. V. 551 (1/2). P. 322-6.

14. *Radulovic J., Kammermeier J., Spiess J.* Relationship between Fos production and classical fear conditioning: effects of novelty, latent inhibition and unconditioned stimulus preexposure // J. Neurosci. 1998. V. 18. P. 7452–7461.

15. *Sandi C., Merino J.J., Cordero M.I., Kruyt N.D., Murphy K.J., Regan C.M.* Modulation of hippocampal NCAM polysialylation and spatial memory consolidation by fear conditioning // Biol. Psychiatry. 2003. V. 54 (6). P. 599–607.

16. *Sandi C., Cordero M.I., Merino J.J., Kruyt N.D., Regan C.M., Murphy K.J.* Neurobiological and endocrine correlates of individual differences in spatial learning ability // Learn Mem. 2004. V. 11 (3). P. 244–252.

17. *Stackman R.W., Hammond R.S., Linardatos E., Gerlach A., Maylie J., Adelman J.P., Tzounopoulos T.* Small conductance Ca^{2+}-activated K^{+} channels modulate synaptic plasticity and memory encoding // J. Neurosci. 2002. V. 22. P. 10163–10171.

18. *Svarnik O.E., Chekhov S.A., Anokhin K.V.* Learning-induced modifications of temporal correlations between retrosplenial cortical neurons in behaving rats // Program № 706.22 2012 Neuroscience Meeting Planner. New Orleans, LA: Society for Neuroscience, 2012. [Online].

19. *Venero C., Tilling T., Hermans-Borgmeyer I., Herrero A.I., Schachner M., Sandi C.* Water maze learning and forebrain mRNA expression of the neural cell adhesion molecule L1 // J. Neurosci. Res. 2004. V. 75 (2). P. 172–181.

20. *Zhang Y.-Q., Ji Y.-P., Mei J.* Behavioral training-induced c-Fos expression in the rat nucleus basalis of Meynert during aging // Brain Research. 2000. V. 879. P. 156–162.

Когнитивные расстройства у детей с вегетативной дистонией

Е.Ю. Степанова, Т.М. Радаева, В.И. Борисов

Нижегородская государственная медицинская академия

Введение

Когнитивные расстройства в детском возрасте остаются одной из наиболее актуальных медико-социальных проблем современной медицины. Дисфункция психоневрологического развития отмечается у 30–56 % здоровых школьников. Психосоциальное развитие ребенка, адаптируясь через параметры высших психических функций, имеет ряд характеристик этого процесса – когнитивных (познавательных) и аффективных (эмоциональных, поведенческих) [6, 7].

В неврологии и нейропсихологии под когнитивными функциями принято понимать наиболее сложные функции головного мозга, необходимые для осуществления процесса рационального познания мира. К таким функциям относятся восприятие информации (гнозис), ее анализ и обработка (так называемые исполнительные функции), хранение информации (память) и передача информации (праксис и речь).

О когнитивных нарушениях говорят в тех случаях, когда отмечается ухудшение в одной или более из вышеуказанных сфер по сравнению с преморбидным уровнем, то есть снижение мнестико-интеллектуальных способностей относительно индивидуальной нормы для данного пациента [3, 12].

Когнитивные расстройства в своем большинстве являются конечным результатом неблагоприятных мультифакториальных процессов, воздействующих на плод и аномальную конституцию будущего ребенка. Расстройство функций может выражаться в нарушении памяти, внимания, психомоторной координации, речи, гнозиса, праксиса, счета, мышления, ориентации, планирования и контроля психической деятельности.

Инвалидизация ребенка происходит в результате значительного ограничения его жизнедеятельности в период формирования высших психических функций, усвоения знаний и умений, в период становления личности. Это приводит к социальной дезадаптации вследствие нарушения развития и роста ребенка и накладывает ограничения не только на проявление личности ребенка, но и на ее формирование.

Результирующим фактором является совокупность патологических нейрофизиологических механизмов, среди которых важное значение имеют сдвиги в работе вегетативной системы, что в свою очередь дисгармонирует нормальное развитие ребенка и способствует формированию когнитивного дефицита.

Нарушения в работе вегетативной нервной системы служит диагностической базой уровня глубины любой психосоматической патологии ребенка.

Дисфункция вегетативной нервной системы часто приводит к такому многогранному заболеванию, как вегетативно-сосудистая дистония, которую выявляют у 25–80 % детей. Следовательно, своевременное выявление и ранняя коррекция вегетативной дистонии поможет избежать неврологических и соматических осложнений, а также улучшить качество жизни ребенка.

Материалы и методы

Исследована группа детей из 30 человек (15 мальчиков, 15 девочек) от 10 до 16 лет с вегетососудистой дистонией. Все дети имели отягощенный анамнез внутриутробного развития и наблюдались с диагнозом перинатальная энцефалопатия на первом году жизни.

При поступлении основные жалобы были на головные боли разной степени выраженности, обмороки, головокружения, сердцебиения, нарушения сна, снижение памяти и концентрации внимания, повышенную возбудимость и быструю утомляемость, эмоциональную лабильность.

В неврологическом статусе – очаговая микросимптоматика в виде оживления сухожильных рефлексов с расширением рефлексогенных зон и наличия патологических рефлексов рук, болезненность при пальпации паравертебральных точек в шейном отделе позвоночника, повышенная потливость ладоней, стоп, красный стойкий дермографизм.

Объективизация вегетативного статуса произведена методом нейрокардиоинтервалографии (НКИГ), основанном на анализе интегральной оценки активности симпатической и парасимпатической нервной системы. Метод позволяет мониторировать изменения вегетативного тонуса и корректировать терапию в процессе лечения. При помощи НКИГ изучались регуляторные реакции в ответ на последовательную смену трех положений тела: I положение – лежа, II – сидя с наклоном головы вперед, III положение – сидя с наклоном головы назад.

Когнитивная адаптация оценивалась с помощью анкетирования детей и нейропсихологического исследования (НПИ), которое включало: методику А.Р. Лурии (оценка памяти, утомляемости, активности внимания); таблицы Шульте (определение устойчивости внимания и динамики работоспособности, эффективности работы, степени врабатываемости и психической устойчивости), шкалу тревоги и депрессии HADS.

Все дети были обследованы двукратно – в начале лечения и после его окончания, некоторые из них обследованы более двух раз для коррекции терапии в процессе лечения.

При анализе результатов использован метод X^2. Достоверность сдвига считалась при $p < 0{,}005$.

Все пациенты получали стандартную фармакотерапию пирацетамом с витаминами группы В в комбинации с физиотерапевтическим воздействием.

Результаты

При обследовании детей методом НКИГ в начале лечения в положении I больше половины группы имели ваготонию – 19 человек (63,3 %), 11 (36,7 %) – симпатотонию. Детей с эйтонией выявлено не было. При переходе в положение II произошло изменение вегетативной регуляции с повышением активности симпатической нервной системы – группа с ваготонией уменьшилась до 11 человек (36,7 %) с переходом в эйтонию – 4 (13,3 %). Группа с симпатотонией увеличилась до 15 (50,0 %) за счет перехода 4 человек (13,3 %) из ваготоников. В III положении произошло изменение вегетативного тонуса практически с возвратом к первоначальному – группа с ваготонией составила 17 человек (56,7 %), эйтония выявлена у 2 (6,7 %), количество детей с симпатотоний вернулось к исходному уровню – 11 человек (36,7 %).

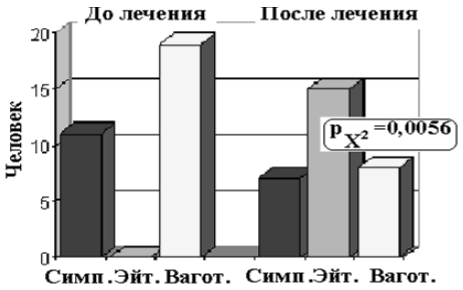


Рис. Вегетативный статус до и после лечения

По данным НПИ нарушение когнитивных функций в различной степени наблюдались у всех детей (100 %). Снижение памяти легкой степени отмечено у 12 человек (40 %), устойчивости внимания – у 18 (60 %), врабатываемости – у 10 (33,3 %), эффективности работоспособности – у 10 (33,3 %), психической устойчивости – у 13 (43,3 %), субклинически выраженная тревога – у 13 (43,3 %), субклинически выраженная депрессия – у 12 (40 %).

На фоне проводимого лечения у всей группы обследуемых клинически наблюдалась положительная динамика в виде уменьшения интенсивности цефалгий и цервикалгий, снижение частоты головокружений, нормализация сна, повышение работоспособности, уменьшения потливости ладоней и стоп.

По результатам НКИГ, проводимого после окончания курса лечения, реакция на перемену положений тела наблюдалась менее выраженная. В положении I группа с ваготонией составила 14 человек (46,7 %), с симпатотонией – 9 (30 %), с эйтонией – 7 (23,3 %). В положении II наблюдался переход из ваготонии в эйтонию 3 детей (10 %), симпатотоники остались без изменения. В III положении произошла более выраженная компенсация вегетативного тонуса, чем у детей до лечения, переход в эйтонию наблюдался у 15 человек (50 %), группа с ваготонией сократилась до 8 че-ловек (26,7 %), с симпатотонией проявила меньшие компенсаторные возможности – 7 (23,3 %), с переходом в эйтонию от начала лечения всего у 4 человек (13,3 %). Сдвиг для ваготоников и нормотоников достоверен ($p = 0{,}0056$).

По данным НПИ наблюдалась слабоположительная динамика: снижение памяти легкой степени отмечено у 4 человек (13,3 %), устойчивости внимания – у 16 (53,3 %), врабатываемости – у 8 (26,6 %), эффективности работоспособности – у 7 (23,3 %), психической устойчивости – у 10 (33,3 %), субклинически выраженная тревога – у 8 (26,6 %), субклинически выраженная депрессия – у 7 (23,3 %).

Заключение

Полученные данные отражают стадийность патологического процесса, где вегетативный статус четко реагирует на любые изменения в организме ребенка.

Анализируя результаты до интегративно-восстановительной терапии, можно судить, что компенсаторные возможности у детей с вегетативно-сосудистой дистонией выражены слабо, характеризуются большой лабильностью вегетативных сдвигов, а также наличию когнитивных расстройств.

На фоне проводимого лечения состояние ваготонии свидетельствует о начальных и эффективно корректируемых стандартной терапией изменениях в организме, а симпатотония свидетельствует о более глубокой патологической реакции и нуждается в поиске новых методов лечения.

Важно отметить, что наличие когнитивного дефицита, в различной степени зафиксированного у всех детей как до, так и после лечения, нуждается в тщательном нейропсихологическом исследовании и поиске дополнительных методов коррекции, так как «стандартная терапия» оказалась в целом неэффективна. Поэтому своевременная диагностика когнитивных и неврологических нарушений, уровня компенсаторных (потенциальных) возможностей, адекватная медико-психологическая помощь в значительной мере снижают степень инвалидизации и повышают социальные возможности ребенка в аспекте обучения, социального контакта. Все вышеизложенное определяет задачи когнитивной неврологии детского возраста, имеющей междисциплинарный характер и охватывающей все стороны жизни ребенка [4, 5].

Литература

1. *Анохин П.К.* Системные механизмы высшей нервной деятельности. М., 1979.

2. *Бадалян Л.О.* Детская неврология. М., 1981. 416 с.

3. *Забрамная С.Д.* Психолого-педагогическая диагностика умственного развития детей. М., 1995. 112 с.

4. *Лурия А.Р.* Основы нейропсихологии. М., 1991. 374 с.

5. Справочник психологии и психиатрии детского и подросткового возраста / под ред. С.Ю. Циркина. СПб. : Питер, 2000. 722 с.

6. *Кубрякова Е.С., Демьянков В.З.* [*и др.*] Краткий словарь когнитивных терминов. М., 1996. 245 с.

7. *Дюк В.А.* Компьютерная психодиагностика. СПб., 1994. 364 с.

8. *Маслова О.И.* Тактика реабилитации детей с задержками нервно-психического развития // Русский медицинский журнал. 2000. Т. 8 (18). С. 746–748.

9. *Маслова О.И., Студеникин В.М.* [*и др.*] Когнитивная неврология // Российский педиатрический журнал. 2000. Т. 5. С. 40–41.

10. *Liu Y., Wang Y.* Cognitive functions of children with attention deficit/hyperactivity disorder // Zhonghua Yi Za Zhi Xue. 2002. V. 82 (6). P. 389–392.

11. Физиология роста и развития детей и подростков : (теоретические и клинические вопросы) / под ред. А.А. Баранова, Л.А. Щеплягиной. М., 2000. 584 с.

12. *Conners C.K.* Nootropes and food // Practitioner's guide to psychoactive drugs for children and adolescents / J.S. Werry, M.G. Aman, eds. N.Y., 1993. P. 373–389.

13. *Гнездицкий В.В*. Вызванные потенциалы мозга в клинической практике. Таганрог : Изд-во ТРТУ, 1997. 252 с.

14. *Mishkin M., Suzuki W., Gadian D.G., Varha-Khadem F.* Hierarhicai organization of cognitive memory // Phi. Trans. R. Soc. bond. B. 1997. V. 352. P. 1461–1467.

15. Способ диагностики вегетативных дисфункций : патент на изобретение № 2242923 / Радаева Т.М. (RU), Капля Э.И. (RU), Трушина И.А. (RU), Куркина С.А. (RU), Радаев М.А. (RU). Дата публикации: 27 декабря 2004.

Исследование связей в головном мозге на основе данных ЭЭГ с помощью метода нелинейных корреляций

А.О. Сельский[1,2], М.О. Журавлев[1], И.В. Егоров[2], А.Е. Храмов[1]

[1] Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
selskiiao@gmail.com
[2] Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
selskiiao@gmail.com

В настоящее время изучение динамики мозга в когнитивной деятельности привлекает большое внимание исследователей. В таких исследованиях часто использовалась электроэнцефалография, поскольку этот метод неинвазивный и не требует значительных ограничений мобильности испытуемых или затрат при проведении экспериментов. В настоящей работе реализован анализ данных головного мозга ЭЭГ в процессе восприятия бистабильного изображения с помощью метода нелинейных корреляций. Функциональную связность между областями головного мозга можно охарактеризовать временной эволюцией корреляции между сигналами, записанными из разных каналов. В настоящее время предложено много различных методов для оценки функциональной связанности. Среди методов нелинейного регрессионного анализа, наиболее подходящего для ЭЭГ данных головного мозга, был выбран метод, основанный на аппроксимации нелинейной кривой кусочно-линейным приближением и не так давно оцененный в модели связанных нейронных популяций. Этот метод имеет некоторые преимущества по сравнению с другими методами анализа сигналов ЭЭГ головного мозга, главными из которых являются когерентность и взаимные корреляционные функции, поскольку он может применяться независимо от того, является ли тип зависимости между двумя сигналами линейным или нелинейным.

Исследования нелинейных процессов в нейронной сети мозга при восприятии неоднозначных (так называемых би- и мультистабильных) изображений очень важны для понимания как визуального распознавания объектов, так и процесса принятия решений. В настоящее время восприятие неоднозначных образов привлекает огромное внимание многих ученых. В некотором смысле такие изображения являются хорошими объектами для изучения визуального восприятия в целом, а также механизмов принятия решений. Изображения этого типа были объектом исследований для психологов в течение длительного времени [1, 2]. В последнее время неоднозначные образы вызывают интерес у физиков и математиков [3, 4].

Несмотря на значительные усилия многих исследователей, основные механизмы, лежащие в основе интерпретации мультистабильного изображения, недостаточно изучены. Известно, что в настоящее время восприятие является результатом нелинейных процессов, происходящих в основном в затылочном, теменном и лобном отделах коры головного мозга [2, 5]. Восприятие неоднозначных (бистабильных) изображений было тщательно исследовано в последнее десятилетие. Наиболее популярными бистабильными изображениями являются ваза Рубина, полосы Маха, тест Роршаха, иллюзия старой/молодой женщины Боринга, куб Неккера и т. д. [6–9]. В настоящей работе в качестве бистабильного изображения был использован набор изображений, основанных на хорошо известном бистабильном объекте, кубе Неккера, в качестве визуального стимула. Это куб с прозрачными гранями и видимыми ребрами. Бистабильность в восприятии заключается в том, что интерпретация этого трехмерного объекта ориентирована двумя различными способами, в частности, если разные ребра куба Неккера рисуются с различной интенсивностью.

Функциональная связь между структурами головного мозга изучалась с помощью анализа нелинейных корреляций [10, 11]. Этот метод анализа сигналов, как правило, демонстрирует надежные измерения для функциональных связей сигналов в головном мозге.

Его главное преимущество перед несколькими другими методами измерения связей состоит в том, что он не предполагает линейную связь между сигналами и способен выявлять информацию о направлении связи. Это анализ во временной области, который может выявить три различных интересных параметра: силу функциональной связи, или максимальную связь между двумя сигналами головного мозга h^2; временные задержки между сигналами структур головного мозга, или время передачи сигнала τ; направление функциональной связи.

Как уже было сказано ранее, в качестве неоднозначного образа при проведении съемки данных ЭЭГ головного мозга использовался несимметричный куб Неккера. Контраст трех средних линий, центрированных в левом среднем углу, использовался как один из параметров управления I, принимающих значения в диапазоне [0; 1]. Если I равно 1, наблюдатель увидит правоориентированный куб, тогда как нулевое значение управляющего параметра соответствует левоориентированному кубу. Интенсивность трех средних линий, центрированных в правом углу, была установлена на уровне $(1 - I)$, а интенсивность шести видимых внешних краев куба была зафиксирована на 1. В ходе экспериментальной съемки данных ЭЭГ значения управляющего параметра будут спонтанно чередоваться между этими двумя проекциями куба Неккера в процессе его визуального восприятия. Лево- и правоориентированные про-

екции куба Неккера и несколько кубов из тех, которые использовались в экспериментах с промежуточными значениями управляющего параметра *I*, которые отличаются от 0 и 1, показаны на рис. 1.

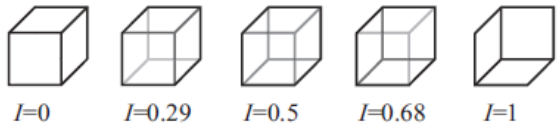


Рис. 1. Несимметричный куб Неккера с предельными и промежуточными значениями управляющего параметра *I*

Изображение куба Неккера было помещено в середину экрана компьютера. Испытуемым было поручено нажимать левую или правую клавиши на панели управления каждый раз, когда их восприятие куба изменилось. Эксперимент состоит из нескольких прогонов по 10 минут каждый. Прогоны могли быть прерваны по выбору испытуемыми, что сводит к минимуму эффекты утомления [6, 12]. Длительность каждого периода при постоянном восприятии вычислялась по временному интервалу между двумя последовательными нажатиями клавиш. Общее время эксперимента составляло около 50 минут для каждого куба. Для организации визуальной стимуляции и регистрации данных использовалось оборудование «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (Медиком МТД) с соответствующей программой. Частота дискретизации ЭЭГ составляла 250 Гц, диапазон частот данных составлял от 0,016 Гц до 70 Гц с режекторным фильтром для 50 Гц. Для регистрации ЭЭГ были использованы монополярный метод регистрации и стандартная международная система «10–20» для размещения электродов [13].

Для оценки степени связи между двумя сигналами с соответствующей временной задержкой коэффициент нелинейной корреляции h^2 рассчитывался как функция временного сдвига τ между двумя сигналами. Эта статистическая оценка была впервые представлена в анализе сигналов ЭЭГ в работах [10, 11, 14]. Она описывает зависимость сигнала *Y* от сигнала *X* в общем виде. Подробности теоретических и практических аспектов этого метода можно найти в вышеупомянутых статьях.

Основная идея состоит в том, что если амплитуда сигнала *Y* рассматривается как функция амплитуды сигнала *X*, то значение *y*, заданное некоторым значением *x*, может быть предсказано в соответствии с кривой нелинейной регрессии. Дисперсия *Y* от кривой регрессии называется объяснимой дисперсией, то есть она объясняется или прогнозируется на основе *X*. При вычитании объяснимой дисперсии из полной дисперсии получается необъяснимая дисперсия. Коэффициент корреляции η^2 выражает уменьшение дисперсии *Y*, которое может быть получено путем прогнозирования значений *y* по кривой регрессии следующим образом: η^2 = (полная дисперсия – необъяснимая дисперсия) / полная дисперсия.

На практике численное приближение кривой нелинейной регрессии получается путем изображения диаграммы рассеяния *y* по *x* отрезкам линейной регрессии. Переменная *x* подразделяется на стеки данных; для каждого стека вычисляется значение *x* средней точки (p_i) и среднее значение *y* (q_i), а результирующие точки (p_i, q_i) связаны сегментами прямых (= отрезки линейной регрессии). Коэффициент нелинейной корреляции h^2, который является оценкой для η^2, теперь может быть вычислен как доля полной дисперсии, которая может быть предсказана отрезками линейной регрессии, следующим образом:

$$h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_{i-(y)})^2 - \sum_{i=1}^{N}(y_{i-f(x_i)})^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_{i-(y)})^2},$$

где *N* – количество отсчетов данных, а <*y*> – среднее значение всех y_i.

Оценка h^2, которая обозначает степень корреляции между двумя сигналами, может принимать значения между 0 (*Y* полностью не зависит от *X*) и 1 (*Y* полностью определяется *X*). В случае линейной зависимости между *x* и *y* η^2 сводится к общему коэффициенту регрессии r^2. Аналогично, как и в случае взаимной корреляции, можно оценить h^2 как функцию временного сдвига τ между сигналом *X* и *Y* или наоборот. Этот сдвиг, при котором достигается максимальное значение h^2, используется как оценка временной задержки между двумя сигналами.

На рисунке 2 продемонстрированы примеры нескольких зависимостей коэффициента нелинейной корреляции h^2 от временного сдвига τ для разных пар каналов ЭЭГ данных. Видно, что в случае связи каналов O2–P4 корреляция сильнее, но задержки нет. Для каналов Pz–P3 корреляция чуть меньше, но видно, что есть небольшая задержка между каналами.

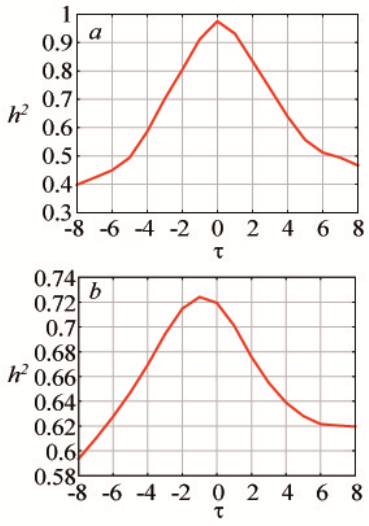


Рис. 2. Зависимость нелинейного коэффициента корреляции h^2 от временного сдвига τ, построенные для каналов O2–P4 (*а*) и Pz–P3 (*б*)

В настоящей работе анализируются данные ЭЭГ головного мозга с использованием метода нелинейных корреляций. Была выявлена сила функциональной связи между сигналами различных структур головного мозга и задержка между ними.

Литература

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

2. *van Luijtelaar G.* [*et al.*] Spike-wave discharges in WAG/Rij rats are preceded by delta and theta precursor activity in cortex and thalamus // Clinical Neurophysiology. 2011. V. 122. P. 687–695.

3. *van Luijtelaar G.* [*et al.*] Methods of automated absence seizure detection, interference bystimulation, and possibilities for prediction in genetic absence models // J. Neurosci. Methods. 2016. V. 260. P. 144–158.

4. *Nazimov A.I.* [*et al.*] Serial identification of EEG patterns using adaptive wavelet-based analysis // Eur. Phys. J. Special Topics. 2013. V. 222. P. 2713–2722.

5. *Doron I.* [*et al.*] Time-Invariant Person-Specific Frequency Templates in Human Brain Activity // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 258101.

6. *Merk I., Schnakenberg J.* A stochastic model of multistable visual perception // Biological Cybernetics. 2002. V. 86. P. 111–116.

7. *van Vugt M.K., Sederberg P.B., Kahana M.J.* Comparison of spectral analysis methods for characterizing brain oscillations // J. Neurosci. Methods. 2007. V. 162. P. 49–63.

8. *Sitnikova E.* [*et al.*] Sleep spindles and spikewave discharges in EEG: Their generic features, similarities and distinctions disclosed with Fourier transform and continuous wavelet analysis // J. Neurosci. Methods. 2009. V. 180. P. 304–316.

9. *Hramov A.E.* [*et al.*] Wavelets in Neuroscience. Heidelberg ; New York ; Dordrecht ; London, 2015. 318 c.

10. *Pijn J.P.M.* Quantitative evaluation of EEG signals in epilepsy: nonlinear associations, time delays and nonlinear dynamics : PhD thesis. University of Amsterdam, 1990.

11. *Pijn J.P.M.* [*et al.*] The use of signal-analysis for the localization of an epileptogenic focus: a new approach // Adv. Epileptology. 1989. V. 17. P. 272–276.

12. *Grubov V.V.* [*et al.*] Demonstration of brain noise on human EEG signals in perception of bistable images // Proc. SPIE. 2016. V. 9707. P. 970702.

13. *Jasper H.H.* The ten-twenty electrode system of the International Federation // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 1958. V. 10. P. 371–375.

14. *Lopes da Silva F.H., Pijn J.P., Boeijinga P.* Interdependence of EEG signals: linear vs. nonlinear associations and the significance of time delays and phase shifts // Brain Tomography. 1989. V. 2. P. 9–18.

Разработка интеллектуальной системы управления роботизированным беспилотным транспортным средством

А.Ю. Сизов, М.И. Тюриков, Л.О. Федосова

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Настоящая статья посвящена разработке системы управления для роботизированного беспилотного наземного транспортного средства в рамках ежегодных соревнований мобильных робототехнических систем «РобоКросс». «РобоКросс» – это испытания мобильных робототехнических систем транспортировки, мониторинга и решения задач испытания транспортных средств на полигонах. Данные соревнования проводятся с целью развития робототехнических систем, которые могут найти практическое применение в краткосрочной перспективе. Основное задание испытаний предполагает разработку робототехнической системы, устанавливаемой на наземное транспортное средство (ТС), которая способна в беспилотном режиме управлять ТС и удерживать его на дороге. Дополнительная часть испытаний предлагает задания по разработке и тестированию систем ADAS (Advanced Driver Assistance Systems), установленных на ТС параллельно с основной робототехнической системой или являющихся частью основной робототехнической системы [1].

В качестве объекта для установки системы управления беспилотным наземным ТС был выбран электрический квадроцикл. Для решения задач испытаний квадроцикл оснастили дополнительными техническими средствами (рис. 1). В качестве рулевого агрегата был использован линейный шаговый актуатор. Для определения центрального положения передних колес рулевой агрегат калибровался с помощью конечного выключателя, расположенного в крайнем правом положении колес.

Рис. 1. Аппаратное оснащение роботизированного беспилотного ТС

Управление роботизированным беспилотным ТС осуществлялось в двух режимах – телеуправляемом и автономном. В телеуправляемом режиме связь с роботом осуществлялась посредством использования двух комплектов точек доступа Wi-Fi Ubiquiti Rocket M2 и двух всенаправленных Wi-Fi 2×2 MIMO антенн Ubiquiti Air Max Omni 2G13, работающих в режиме моста. Один комплект был установлен на ТС, второй находился у оператора. Рабочее место оператора было оснащено ПК, управление ТС велось с пульта. Видеоданные с камеры передавались по сети Wi-Fi на ПК оператора.

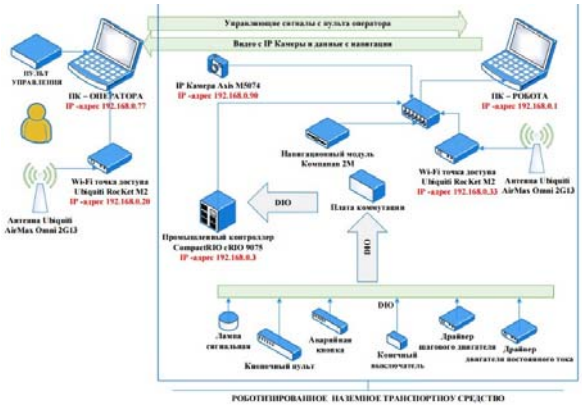


Рис. 2. Структурная схема роботизированного ТС в телеуправляемом режиме

В автономном режиме (рис. 3) для определения положения и параметров движения использовалась бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС). Для обнаружения препятствий применялся лазерный сканирующий дальномер HOKUYO.

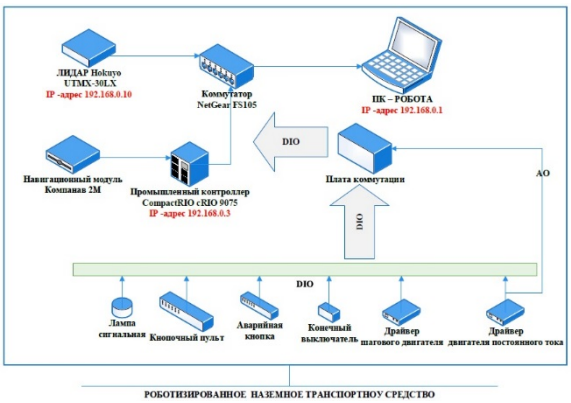


Рис. 3. Структурная схема роботизированного ТС в автономном режиме

Программное обеспечение для роботизированного беспилотного ТС разрабатывалось в среде программирования NI LabVIEW с использованием модулей NI FPGA, NI LabVIEW Real Time, NI Robotics, NI Vision Development Module.

Система управления роботизированным ТС имеет двухуровневую структуру (рис. 4). Для реализации нижнего уровня управления использовал-

ся контроллер NI CompactRIO 9075 на базе ПЛИС Xilinx Spartan-6 с модулями ввода/вывода NI 9263, NI 9205, NI 9403, NI 9870.

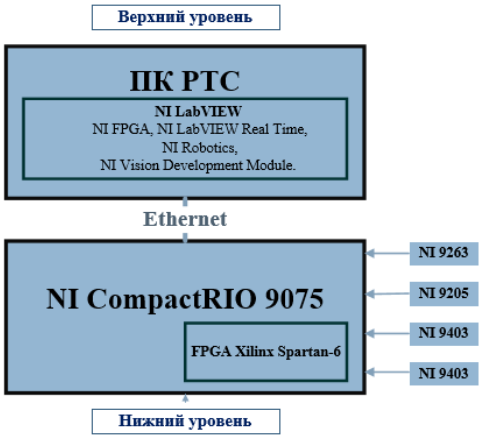


Рис. 4. Структура системы управления беспилотным роботизированным ТС

На этом уровне решались следующие задачи: управления исполнительными и сигнальными элементами, получение данных с кнопочного пульта, аварийной кнопки и конечного выключателя и калибровка рулевого агрегата. Нижний уровень управления не меняется в зависимости от режима работы ТС. Верхний уровень для телеуправляемого режима работы представляет собой УП, реализованную на ПК оператора и ПК робота. Передача осуществлялась по UDP- и TCP/IP-протоколам. Верхний уровень для автономного режима работы представляет собой УП, реализованную на ПК робота. На этом уровне осуществляется получение и обработка данных с навигации и лидара. На основе полученных данных решались задачи навигации и объезда препятствий.

Алгоритм автономного движения ТС по трассе имел следующий вид: в УП вносились координаты точек следования, робот стремился оказаться в максимально близкой окрестности точки, при этом по данным с лидара строилась картина препятствий и определялись веса свободных участков, оценивались их размеры и близость к требуемому вектору движения. В результате получался заданный курс, максимально близкий к требуемому, но проходящий через свободное пространство. При достижении максимально возможного приближения к текущей заданной точке маршрута робот переключался на следующую. В случае, когда ТС достигало точки в зоне разворота, робот осуществлял поворот на 180 градусов и следовал в зону старта/финиша по заданным точкам в обратном порядке.

Данный алгоритм автономного движения ТС был протестирован на работоспособность в виртуальной среде Robotics Environment Simulator (рис. 5). В ходе процесса симуляции робот успешно объезжал препятствие, осуществлял движение по точкам с заданными координатами и осуществлял разворот в заданной зоне. Отработанный алгоритм был использован на реальной модели с учетом ее отличий от виртуальной.

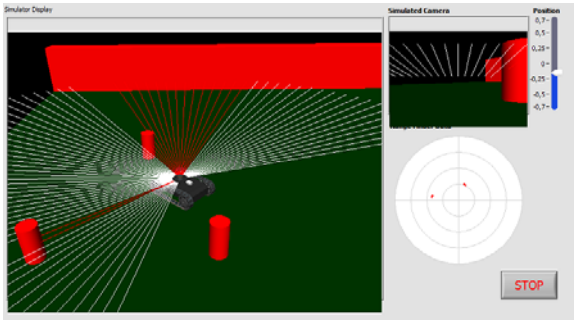


Рис. 5. Симуляция автономной работы робота в среде Robotics Environment Simulator

Для решения задач по разработке и тестированию систем ADAS был реализован модуль технического зрения, который осуществляет распознавание дорожных знаков и сигналов светофора на пути движения ТС. Модуль технического зрения (рис. 6) создан с использованием компонентов NI Vision Development Module [2]. Распознавания дорожных знаков ведется путем задания эталонов, т. е. для каждого класса объектов известно одно или несколько эталонных изображений. На основе этой информации необходимо классифицировать каждое вновь предъявляемое изображение. Для осуществления поиска эталонного изображения в среде LabVIEW использовалась функция IMAQ Find Pattern VI палитры Machine Vision, которой в качестве входного параметра необходимо было задать эталонные изображения дорожных знаков. Распознавание сигналов светофора осуществляется путем поиска окружности определенного радиуса на изображении (функция Binary Circle Detection). Изображение предварительно переведено из цветного (RGB) в серое (Grayscale) путем выделения зеленого канала и затем отфильтровано по пороговому значению (функция Threshold Grayscale to Binary).

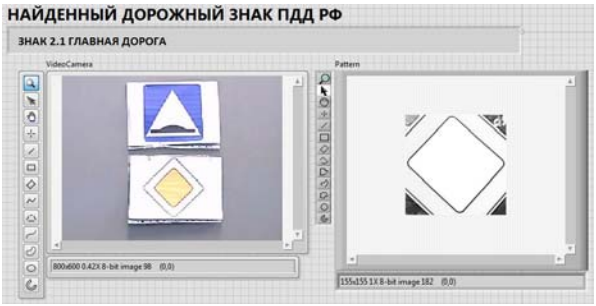


Рис. 6. Интерфейс модуля распознавания

В настоящее время осуществляется разработка системы управления для наземного транспортного средства с двигателем внутреннего сгорания.

Литература

1. Официальный сайт программы «Робототехника: инженерно-технические кадры инновационной России» : [Электронный ресурс]. URL: http://www.russianrobotics.ru/.

2. *Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Князь В.А., Ходарев А.Н., Моржин А.В.* Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. М. : ДМК Пресс, 2007. 464 с.

Медленноволновая активность на ЭЭГ при абсанс-эпилепсии

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 – один из наиболее востребованных инструментов исследования активности головного мозга человека и животных. Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) представляет собой последовательность значений биопотенциалов, зарегистрированных во времени (т. е. временной ряд). Анализ ЭЭГ традиционно поводят в домене частот. На чернильных записях (до внедрения цифровых технологий) частоту ЭЭГ измеряли вручную как количество волн в единицу времени (1 с). Активность на ЭЭГ классифицировали по основным частотным диапазонам: альфа (8–13 Гц), бета (14–40 Гц), тета (4–8 Гц), дельта (0,5–3 Гц), гамма (выше 40 Гц).

Характер ЭЭГ во время сна резко отличается от такового в состоянии бодрствования (рис. 1). «Сон – это особое генетически детерминированное состояние организма человека (и теплокровных животных, т. е. млекопитающих и птиц), характеризующееся закономерной последовательной сменой определенных полиграфических картин в виде циклов, фаз и стадий» [1].

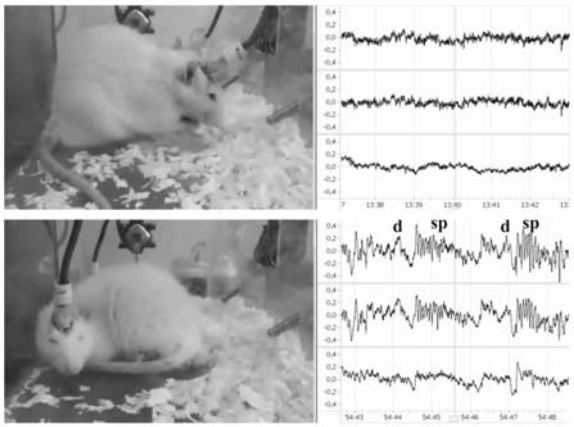


Рис. 1. Примеры видеорегистрации ЭЭГ у крысы WAG/Rij (самец, 5 мес.) во время бодрствования и сна. Запись в свободном поведении с использованием 3 эпидуральных электродов, вживленных над областью лобной коры (справа и слева) и затылочной коры: *sp* – сонное веретено, *d* – дельта-волна

Во время медленного (non-REM) сна у человека и животных на ЭЭГ наблюдают мощную ритмическую (полиритмическую) активность с преобладанием медленноволновых компонентов с частотой <12 Гц. По форме медленноволновой активности во время сна выделяют сонные веретена (8–14 Гц) и дельта-волны (1–4 Гц). Ранние фазы сна (фаза 2 non-REM сна у человека) характеризуются наличием на ЭЭГ сонных веретен (*sp* на рис. 1). По мере углубления сна сонные веретена сменяются дельта-волнами (*d* на рис. 1). У человека во время глубокого сна (фаза 3, дельта-сон[1]) сонные веретена полностью исчезают и преобладают мощные дельта-волны [2]. У крыс глубокий медленный сон характеризуется наличием высокоамплитудных сонных веретен, перемежающихся с дельта-волнами. Известно, что сонные веретена и дельта-волны формируются в результате взаимодействия между нейронами таламуса и коры больших полушарий [3]. Генератором сонных веретен служит таламическая нервная сеть, объединяющая релейные ядра таламуса и ретикулярное ядро таламуса. Сонные веретена по системе восходящих проекций распространяются в неокортекс [4]. Источником дельта-активности может быть и таламус, и неокортекс [3; 5].

Таламическая дельта-активость (1–4 Гц) имеет очень регулярную структуру (clock-like) и формируется на фоне гиперполяризации (–65...–70 мВ) нейронов релейных ядер таламуса. Именно эти нейроны генерируют сонные веретена в состоянии менее выраженной гиперполяризации (–60 мВ), взаимодействуя с нейронами ретикулярных ядер таламуса [5]. Таким образом, таламическая дельта-активность несовместима с сонными веретенами на уровне отдельного таламического нейрона.

Второй источник дельта-активности – нейронные сети коры больших полушарий нейронов, объединяющие пирамидные нейроны слоев III–V [5]. Амплитуда кортикальной дельта-активности постепенно увеличивается при переходе от состояния дремоты до глубокого сна.

Итак, медленноволновая активность во время сна имеет полиритмический характер. ЭЭГ во время сна представляет собой смесь отдельных коротких ритмических компонентов, длящихся 1–2 с (transient events), которые сложно исследовать из-за их нестационарной природы, малой длительности и наложения друг на друга. Тем не менее исследование отдельных компонентов ЭЭГ во время сна имеет важное диагностическое значение, особенно для ранней диагностики нарушениями ритмической активности головного мозга, которые наиболее ярко проявляются при эпилепсии. Разложение сигнала ЭЭГ на отдельные составляющие можно осуществить с использованием нескольких подходов, например метода соответствия образцу (template matching), метода выделения независимых компонент. Эти методы позволяют выделить ритмические компоненты (transients) на ЭЭГ с высокой степенью точности, но не дают информации об их изменении во времени. Для исследования взаимоотношений между

[1] Американская академия медицины сна (AASM) в 2007 г. рекомендовала объединить 3 и 4 стадии сна и выделять одну стадию N3 – глубокий медленноволновый сон [2].

дельта-активностью и сонными веретенами на ЭЭГ мы использовали непрерывное вейвлетное преобразование и построение хребтов вейвлетных поверхностей [6], что дало возможность исследовать динамику доминантных и субдоминантных частот на ЭЭГ.

Исследовали ритмическую активность на ЭЭГ в диапазонах дельта-активности (1–4 Гц) и сонных веретен (10–16 Гц) у крыс линии WAG/Rij с врожденной предрасположенностью к абсанс-эпилепсии [7, 8]. Абсанс-эпилепсия у человека и крыс не сопровождается нарушением двигательных функций и может быть диагностирована только посредством ЭЭГ. У крыс WAG/Rij приступы абсанс-эпилепсии сопровождаются высокоамплитудными гиперсинхронными 8–10 Гц пик-волновыми разрядами на ЭЭГ [7], амплитуда которых выше в лобной части коры (рис. 2).

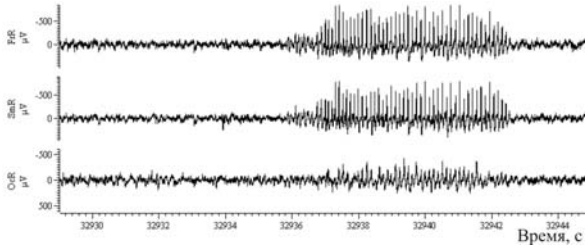


Рис. 2. Пик-волновый разряд на ЭЭГ у крысы WAG/Rij (самец, возраст 8 мес.). Запись произведена в свободном поведении с использованием 3 эпидуральных электродов, вживленных над лобной областью коры (FrR), париетальной (SmR) и затылочной (OcR) областями

По данным литературы у крыс линии WAG/Rij эпилептическая активность полностью сформирована к возрасту 8–9 месяцев [8]. Однако в нашей выборке крыс WAG/Rij, состоящей из 10 особей этого возраста, у 5 особей не были обнаружены пик-волновые разряды. Это дало нам возможность исследовать особенности медленноволновой активности у крыс генетически имбредной линии, имевших генетическую склонность к абсанс-эпилепсии, но без признаков этого заболевания.

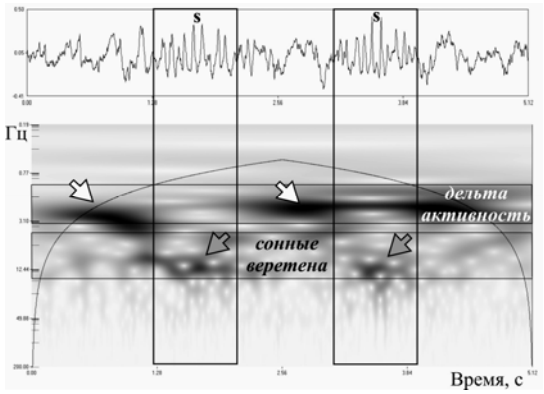


Рис. 3. Лобная ЭЭГ во время медленноволнового сна у крысы WAG/Rij (самец, возраст 8 месяцев), содержащая сонные веретена (s). Вейвлетная поверхность получена путем непрерывного вейвлетного преобразования с помощью комплексного вейвлета Морле. «Сонным веретенам» соответствуют всплески энергии ~12 Гц (серые стрелки). Между сонными веретенами усиливалась мощность дельта-частот (1–4 Гц, белые стрелки)

Сонные веретена были распознаны на ЭЭГ автоматически с помощью алгоритма, разработанного нашей группой [9–11]. На рис. 3 видно, что сонным веретенам соответствуют всплески энергии с пиком мощности в области 12 Гц. Перед началом сонных веретен можно видеть усиление мощности в диапазоне низких частот (ниже 7 Гц, 1–4 Гц на рис. 3). Именно этот диапазон 2–7 Гц был выбран для исследования ритмической активности, предшествующей сонным веретенам (НЧ-предшественники).

Для автоматического выделения НЧ-предшественников рассчитывали вейвлентый спектр $w(t)$ в течение интервала времени T, который составил 2 с до начала сонного веретена:

$$w(t) = \frac{1}{T}\int_{t-T/2}^{t+T/2} W(\tau)d\tau,$$

где $W(t)$ – мощность спектра,

$$W(t) = \int_{F_s} |A(f_s,t)|^2 df_s,$$

где $f_s \in [2–7]$ Гц, $A_i(f_s, t)$ – непрерывное вейвлетное преобразование сигнала $X(t)$,

$$A_i(f_s,t) = \sqrt{f_s}\int_{t-1/f_s}^{t+1/f_s} X_i(t')\varphi^*\left((t-t')f_s\right)dt'\varphi(\eta) =$$

$$= \pi^{1/4}\exp[i\omega_0\eta]\exp\left[\frac{-\eta^2}{2}\right].$$

Исследовали следующие частотно-временные параметры сонных веретен и их НЧ-предшественников:

1) частоту (Гц) – среднюю частоту вейвлетной поверхности $f_i = \frac{1}{t_{end}-t_{start}}\int_{t_{start}}^{t_{end}} f_{\max}(t)\,dt,$

где t_{start} и t_{end} – частота в начальной и конечной точке сонного веретена (и его НЧ-предшественника), $f_{\max}(t)$ – частота, соответствующая максимальной мощности в интервале времени [t_{start}; t_{end}];

2) относительную среднюю амплитуду НЧ-предшественников

$$R_a = \frac{R_p}{R_{SS}},$$

где R_p – средняя амплитуда НЧ-предшественника, R_{SS} – средняя амплитуда сонного веретена;

3) нормированную среднюю амплитуду низкочастотных предшественников

$$r_a = \sqrt{\frac{f_p}{f_{SS}}}\frac{R_p}{R_{SS}},$$

где f_p – средняя частота предшественника, f_{SS} – средняя частота сонного веретена, $\sqrt{\frac{f_p}{f_{SS}}}$ – нормирующий фактор, необходимый для корректной оценки соотношения амплитуд на вейвлетном спектре [11].

Результаты статистического анализа параметров сонных веретен и предшествующей низкочастотной (НЧ) ритмической активности у крыс WAG/Rij двух групп показаны в таблице (среднее ± станд. откл.).

	Без эпилепсии (n = 5)	С эпилепсией (n = 5)
Число сонных веретен в час	191 ± 32	122 ± 8 *
Частота сонных веретен	11,7 ± 0,5	12,0 ± 0,6
% сонных веретен с НЧ-предшественниками	69 ± 11	43 ± 8 *
Частота НЧ-предшественников	4,69 ± 1,30	3,75 ± 0,56
Длительность НЧ-предшественников	0,67 ± 0,13	0,64 ± 0,12
Относительная амплитуда НЧ-предшественников, R_a	0,76 ± 0,07	0,70 ± 0,08
Нормированная амплитуда НЧ-предшественников, r_a	0,52 ± 0,06	0,39 ± 0,05 *

* – значимые отличия между группами крыс (критерий Манна – Уитни, $p < 0,05$).

Итак, у крыс WAG/Rij с классическим «эпилептическим» фенотипом по сравнению с крысами без признаков эпилепсии обнаружено: 1) меньшее число сонных веретен; 2) меньший процент сонных веретен, которым предшествовала НЧ-активность (43 % против 69 %); 3) более низкая нормированная амплитуда НЧ-предшественников. Последний факт означает, что при переходе от предшественника к сонному веретену у «эпилептических» крыс происходил менее значимый рост мощности ЭЭГ в диапазонах пиковых частот, чем у крыс без признаков эпилепсии.

Таким образом, медленноволновая ритмическая активность на ЭЭГ, сопровождающая появление сонных веретен, является чувствительным индикатором патологии таламо-кортикальной сети при абсанс-эпилепсии. Снижение числа сонных веретен и отсутствие медленноволновой активности, предшествующей началу сонных веретен, можно отнести к фактору риска формирования абсанс-эпилепсии при соответствующей генетической предрасположенности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-04-00275) и гранта Министерства образования и науки РФ (проект 3.861.2017/4.6).

Литература

1. *Ковальзон В.М.* О функциях сна // Журн. эволюц. биохимии и физиологии. 1993. Т. 29, № 5/6. С. 627–634.

2. *Silber M.H.* [*et al.*] The visual scoring of sleep in adults // J. Clin. Sleep Med. 2007. V. 3, № 2. P. 121–131.

3. *Steriade M.* Neuronal substrates of sleep and epilepsy. Cambridge University Press, 2003.

4. *Contreras D., Steriade M.* Cellular basis of EEG slow rhythms: a study of dynamic corticothalamic relationships // J. Neurosci. 1995. V. 15 (1. Pt. 2). P. 604–622.

5. *Steriade M., McCarley R.W.* Synchronized Brain Oscillations Leading to Neuronal Plasticity during Waking and Sleep States // Brain control of wakefulness and sleep. New York : Kluwer Academic, 2005. P. 255–344.

6. *Sitnikova E.* [*et al.*] Rhythmic activity in EEG and sleep in rats with absence epilepsy // Brain Res. Bull. 2016. V. 120. P. 106–116.

7. *Coenen A.M., van Luijtelaar E.L.* Genetic animal models for absence epilepsy: a review of the WAG/Rij strain of rats // Behav. Genet. 2003. V. 33, № 6. P. 635–655.

8. *Coenen A.M.L., van Luijtelaar E.L.J.M.* The WAG/Rij rat model for absence epilepsy: age and sex factors // Epilepsy Res. 1987. V. 1. P. 297–301.

9. *Короновский А.А.* [*и др.*] Диагностика и анализ осцилляторной нейросетевой активности головного мозга с использованием непрерывного вейвлетного преобразования // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 1. С. 86–108.

10. *Ситникова Е.Ю.* [*и др.*] Возрастные изменения частотно-временно́й структуры сонных веретен на ЭЭГ у крыс с генетической предрасположенностью к абсанс-эпилепсии (линия WAG/Rij) // Журн. высш. нервн. деят. 2012. Т. 62, № 6. С. 733–744.

11. *Короновский А.А.* [*и др.*] Вейвлеты в нейродинамике и нейрофизиологии. М. : Физматлит, 2013. 272 с.

Динамика мозгового обеспечения поведения после перехода от задания к заданию при их чередовании

А.А. Созинов, Ю.В. Гринченко, Ю.И. Александров

Институт психологии РАН, Москва
Государственный академический университет гуманитарных наук, Москва
alesozinov@yandex.ru

Возможность чередования заданий предполагает завершение выполнения одной формы поведения и переход к выполнению другой, то есть смену форм поведения. В рамках представлений о когнитивных процессах этот переход рассматривается как проявление процесса исполнительного контроля (например, [11]). Отдельные компоненты этого процесса связываются с активностью цингулярной коры мозга млекопитающих [15, 17, 18]: например, необходимость смены поведения связывается с активацией передней цингулярной коры, а обеспечение переходов между различными новыми формами поведения – с активацией задней цингулярной коры. В то же время показано, что чередование ранее сформированных форм поведения обеспечивается не готовым универсальным механизмом перехода от одной сформированной структуры памяти к другой – оно формируется в результате научения [8, 16]. Кроме того, при варьировании различных параметров заданий иногда не удается идентифицировать одну, «специальную» зону мозга, активность которой специфически связана со сменой поведения [12, 14]. Поэтому описание процессов, лежащих в основе смены форм поведения, необходимо проводить на основе данных регистрации активности отдельных нейронов в ходе выполнения поведения.

Ранее было обосновано, что связь активности нейронов с выполнением актов поведения объясняется не столько выполнением определенной «функции», сколько решением данной поведенческой задачи [1, 4, 9, 13], в том числе на материале активности нейронов цингулярной коры [5, 10, 19]. Многократно описаны нейроны, специализированные относительно систем актов поведения, зарегистрированные как в задней, так и в передней цингулярной коре [3, 6, 7]. Поэтому мы предположили, что различия активности передней и задней зон цингулярной коры при чередовании обусловлены особенностями их вовлечения в обеспечение чередующихся форм поведения, а именно динамикой межсистемных отношений [2].

Для проверки этого предположения была проанализирована активность отдельных нейронов передней (AP – 4 мм; ML ± 1–2 мм; VD + 2–6 мм) или задней (AP + 9 мм; ML ± 1–2 мм) зон цингулярной коры мозга кроликов, зарегистрированная стеклянными электродами (2,5M KCl; 3–6 МОм на частоте 1 кГц) в ходе чередования животными двух форм поведения на симметричных сторонах экспериментальной камеры. На каждой стороне нажатие на педаль приводило к получению пищи из кормушки. Смена одной эффективной стороны на противоположную происходила при выполнении 7 или более циклов поведения. Запись активности нейронов проводили в течение 4–5 дней для каждой зоны мозга (см. подробнее [7]). Если активация нейрона имела место при каждом выполнении данного акта поведения, то нейрон называли специализированным относительно системы акта поведения; остальные нейроны называли неидентифицированными (см., например, [3]). Также на основе вероятности активации (более 0,6 и менее 1,0) выделяли группу нейронов с «неспецифическими» активациями (см. там же). Частоту спайков в первом цикле после смены, втором цикле, а также медиану частот не менее четырех последующих циклов сопоставляли между специализированными и неидентифицированными нейронами передней и задней цингулярной коры. Для этого использовали дисперсионный анализ с повторными измерениями (факторы: Номер цикла, Зона мозга и Специализация).

Выявлено, что специализированные и неидентифицированные нейроны характеризуются различными изменениями частоты спайков от цикла к циклу после смены формы поведения (дисперсионный анализ с повторными измерениями, взаимодействие факторов «Номер цикла» и «Специализация», $F = 3{,}33$, $p = 0{,}041$). Кроме того, эта динамика различалась между передней и задней зонами (взаимодействие факторов «Номер цикла», «Зона мозга» и «Специализация», $F = 3{,}45$, $p = 0{,}036$). В частности, в передней цингулярной коре частота спайков специализированных нейронов повышалась, а неидентифицированных нейронов – снижалась от цикла к циклу после смены формы поведения. В задней цингулярной коре частота спайков повышалась у подгруппы неидентифицированных нейронов с неспецифическими активациями.

Таким образом, динамика активности нейронов после смены формы поведения в ходе чередования заданий различается между передней и задней зонами цингулярной коры. Этот результат находится в соответствии с приведенными данными литературы, в том числе результатами функционально-анатомических исследований. В то же время динамика активности нейронов после смены связана с их вовлечением в обеспечение поведения. Следовательно, особенности активации передней и задней цингулярной коры после смены обусловлены процессами системной организации поведения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 17-06-00653) в рамках исследовательской программы ведущей научной школы РФ (НШ-9808.2016.6).

Литература

1. *Александров Ю.И.* Психофизиологическое значение активности центральных и периферических нейронов в поведении. М. : Наука, 1989.

2. *Александров Ю.И., Шевченко Д.Г., Горкин А.Г., Гринченко Ю.В.* Динамика системной организации поведения в его последовательных реализациях // Психологический журнал. 1999. Т. 20, № 2. С. 82–89.

3. *Александров Ю.И., Горкин А.Г., Созинов А.А., Сварник О.Е., Кузина Е.А., Гаврилов В.В.* Консолидация и реконсолидация памяти : психофизиологический анализ // Вопросы психологии. 2015. № 3. С. 133–144.

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

5. *Горкин А.Г., Шевченко Д.Г.* Отражение структуры памяти в активности системоспецифичных нейронов // Психологический журнал. 1991. Т. 12, № 2. С. 60–69.

6. *Кузина Е.А., Горкин А.Г., Александров Ю.И.* Активность нейронов ретросплениальной коры крыс на ранних и поздних этапах консолидации памяти // Журнал ВНД им. И.П. Павлова. 2015. Т. 65, № 2. С. 248–253.

7. *Созинов А.А., Гринченко Ю.В., Казымаев С.А., Александров Ю.И.* Показатели стабильности и динамики мозгового обеспечения нового поведения // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015 : труды IV Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2015. С. 220–222.

8. *Тимофеева Н.О.* Нейронная организация индивидуальных форм адаптивного поведения : автореф. докт. дисс. М., 2002. 54 с.

9. *Швырков В.Б.* Системная детерминация активности нейронов в поведении // Успехи физиологических наук. 1983. Т. 14, № 1. С. 45–66.

10. *Alexandrov Yu.I., Grinchenko Yu.V., Laukka S., Järvilehto T., Maz V.N., Svetlajev I.A.* Acute effect of ethanol on the pattern of behavioral specialization of neurons in the limbic cortex of the freely moving rabbit // Acta Physiologica Scandinavica. 1990. V. 140. P. 257–268.

11. *Bleckley M.K., Foster J.L., Engle R.W.* Working memory capacity accounts for the ability to switch between object-based and location-based allocation of visual attention // Memory & Cognition. 2015. V. 43, № 3. P. 379–388.

12. *Calcott R.D., Berkman E.T.* Neural correlates of attentional flexibility during approach and avoidance motivation // PLoS ONE. 2015. V. 10, № 5. Art. e0127203.

13. *Cisek P., Kalaska J.F.* Neural mechanisms for interacting with a world full of action choices // Annual Review of Neuroscience. 2010. V. 33. P. 269–298.

14. *Dreher J.C., Koechlin E., Ali S.O., Grafman J.* The roles of timing and task order during task switching // Neuroimage. 2002. V. 17, № 1. P. 95–109.

15. *Karayanidis F., Coltheart M., Michie P.T., Murphy K.* Electrophysiological correlates of anticipatory and poststimulus components of task switching // Psychophysiology. 2003. V. 40. P. 329–348.

16. *Peters G.J., David C.N., Marcus M.D., Smith D.M.* The medial prefrontal cortex is critical for memory retrieval and resolving interference // Learning & Memory. 2013. V. 20, № 4. P. 201–209.

17. *Poulsen C., Luu P., Davey C., Tucker D.M.* Dynamics of task sets: evidence from dense-array event-related potentials // Cognitive Brain Research. 2005. V. 24. P. 133–154.

18. *Umemoto A., Holroyd C.B.* Exploring individual differences in task switching: persistence and other personality traits related to anterior cingulate cortex function // Progress in Brain Research. 2016. V. 229. P. 189–212.

19. *Weible A.P., Rowland D.C., Pang R., Kentros C.* Neural correlates of novel object and novel location recognition behavior in the mouse anterior cingulate cortex // J. Neurophysiology. 2009. V. 102, № 4. P. 2055–2068.

Вариабельность сердечного ритма при разных стратегиях решения моральных дилемм «свой» – «чужой» детьми на последовательных стадиях онтогенеза

И.М. Созинова[1], А.В. Бахчина[1,2], Ю.И. Александров[1,3]

[1] Институт психологии РАН, Москва
eiole@yandex.ru
[2] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
nastya18-90@mail.ru
[3] Государственный академический университет гуманитарных наук, Москва
yuraalexandrov@yandex.ru

В основе современных общечеловеческих проблем, таких как расизм, национализм, этноцентризм, ксенофобия, лежит различие в моральных правилах, которыми индивиды руководствуются при взаимодействии с членами «своей» и «чужой» группы. Эти моральные правила являются устойчивыми, зафиксированными в культуре формами взаимодействия, прошедшими отбор в процессе эволюции группы, в которой они применяются.

Парохиальный альтруизм (помощь «своим» с враждебным отношением к «чужим»), по-видимому, на ранних стадиях эволюции человечества определял нравственные отношения с другими в условиях межгрупповой конкуренции [5]. Несмотря на ориентацию на толерантное отношение и снижение предубеждений к «чужим», проявление парохиального альтруизма можно наблюдать и у людей в наши дни, например, в условиях нехватки времени для обдумывания решения [12]. При этом степень парохиального альтруизма ниже у людей, проявляющих больший уровень аутгрупповой эмпатии [11].

Можно предположить, что отношение к другим эволюционировало в условиях увеличения числа групп и эпизодов межгрупповых взаимодействий. Существуют данные о том, что для реализации реципрокного альтруизма, который может быть направлен и на членов «чужой» группы, необходима большая когнитивная сложность субъекта поведения [7]. Это означает, что реципрокный альтруизм мог распространиться позже в филогенезе человека.

С позиции системно-эволюционного подхода [10] любое поведение, в том числе и решение моральных дилемм, реализуется путем одновременной актуализации систем, сформированных на разных этапах фило- и онтогенеза [1, 2]. Ранее в наших исследованиях [9] было обнаружено, что дети на более поздних стадиях онтогенеза (6–7 лет, 8–9 лет, 10–11 лет) достоверно чаще выбирают помощь «чужому», нежели дети на более ранних стадиях онтогенеза (3–5 лет) в ситуациях, когда «своему» и «чужому» нужен ресурс: первому – для необязательного блага, а второму – для выживания. Вероятно, в условиях этого конфликта выбор «своего» является стратегией, основанной на реализации более старых фило- и онтогенетических систем, связанных в том числе и с парохиальным альтруизмом, а в основе выбора «чужого» лежит актуализация позднее сформированных систем. Тогда можно предположить, что при реализации новой стратегии в специальных условиях конфликта потребностей своего и чужого будет возникать «межсистемное рассогласование» между более древними и вновь сформированными системами, так как реализация этой стратегии также будет обеспечиваться путем актуализации систем разного возраста, направленных на достижение прежде не согласовывавшихся целей. У детей на более поздних этапах онтогенеза в структуре индивидуального опыта сформировано больше «новых» систем, актуализация которых вступает в противоречие с актуализацией более «древних» систем. Следовательно, можно предположить, что межсистемное рассогласование будет больше у детей на более поздних стадиях онтогенеза, нежели у детей на более ранних стадиях онтогенеза.

Так как рядом авторов отмечается, что изменения в вариабельности сердечного ритма (ВСР) отражают адаптационные процессы в организме [3, 4, 6] (в частности, изучены особенности динамики спектральных показателей ВСР при стрессе, который связан с сильным межсистемным рассогласованием [4], то с помощью анализа ВСР, вероятно, можно будет оценить разницу в межсистемном рассогласовании при решении моральных дилемм «свой» – «чужой» у детей разного возраста.

В исследовании принимали участие дети 4–5 лет ($N = 16$) и 10–11 лет ($N = 13$). Эксперимент состоял из трех фаз, в течение которых проводилась непрерывная регистрация сердечного ритма фотоплетизмографом RB-16CPS (нейролаб) и / или беспроводным датчиком Zephyr HxM BT. Первая фаза – беседа – знакомство экспериментатора с ребенком, вторая – решение моральных дилемм «свой» – «чужой» (подробнее методику см. [8]), третья – решения психологических тестов, в которых не было задачи выбора одного из предложенных решений. Моральные дилеммы заключались в необходимости решить, кому отдать ограниченный ресурс – члену «чужой» группы, которому ресурс нужен для выживания, или члену «своей» группы, которому ресурс нужен для необязательного дополнительного комфорта.

Пульсограммы, полученные с помощью фотоплетизмографа, были перекодированы в последовательности RR-интервалов с помощью программы Neuru. Спектральные показатели ВСР были получены с помощью программы RRv7 (длина окна – 100 с; шаг – 10 с). Статистические расчеты были произведены с помощью программы IBM SPSS Statistic 17.

Были проанализированы спектральные показатели ВСР: общая мощность (TP), мощность низкочастотного компонента (LF), мощность высокочастотного компонента (HF), соотношение мощностей низко- и высокочастотного компонентов (LF/HF). Не было обнаружено достоверных различий в распределениях спектральных показателей ВСР между разными фазами эксперимента у детей на разных стадиях онтогенеза (Краскелл – Уоллис, $p > 0,05$). Данные показатели были сопоставлены у детей 4–5 лет с разными стратегиями решения моральных дилемм «свой» – «чужой»: «за своих» (доля ответов в пользу «чужого» меньше 0,5); «за чужих» (доля ответов в пользу «чужого» более 0,5) и детей 10–11 лет, предпочитающих помочь «чужому» (только 2 человека из 13 были исключены в данную группу, так как доля ответов в пользу «чужого» меньше 0,5). Получены достоверные различия между детьми 4–5 лет со стратегией «за своего» и «за чужого» в распределениях LF/HF во время решения моральных дилемм и после (Манн – Уитни, $p = 0,005$; $p = 0,036$). Также были обнаружены различия между LF/HF у детей 4–5 лет из группы «за своего» и детей 10–11 лет «за чужого» во всех фазах эксперимента (Манн – Уитни; $p = 0,013$; 0,005; 0,013 соответственно). А также выявлены достоверные различия в распределениях LF/HF детей группы 4–5 лет «за чужого» и группы 10–11 лет «за чужого» (Манна – Уитни; $p = 0,038$).

В ходе частотного анализа было обнаружено, что у детей на более поздних стадиях онтогенеза LF/HF выше, нежели у детей на более ранних стадиях онтогенеза; также LF/HF выше у детей со стратегией «за чужого» по сравнению с детьми со стратегией «за своего» (рисунок). В остальных показателях различий обнаружено не было.

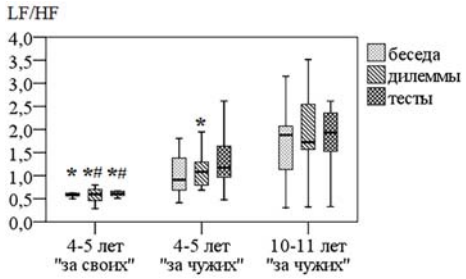


Рис. Сравнение LF/HF во время решения моральных дилемм «свой» – «чужой» у детей с разными стратегиями поведения на разных стадиях онтогенеза: * – сопоставление с группой 10–11 лет «за чужого», критерий Манна – Уитни, $p < 0,05$; # – сопоставление с группой 4–5 лет «за чужих», критерий Манна – Уитни, $p < 0,05$

Рядом авторов отмечается, что LF/HF является показателем стресса, напряжения ресурсов регуляции сердечно-сосудистой «системы» [3, 4]. Рост LF/HF с одновременным снижением TP рассматривается как маркер стресса [4]. Если это так, можно предположить, что высокие показатели LF/HF отражают увеличение степени рассогласования. Тогда полученные нами результаты не позволяют нам отвергнуть гипотезу о том, что при решении моральных дилемм «свой» – «чужой» у детей на более поздних этапах онтогенеза степень межсистемного рассогласования выше, чем у детей на более ранних стадиях онтогенеза, так как у них больше вновь сформированных систем, вступающих в рассогласование с более «древними» системами в специальной ситуации конфликта целей, связанных с реализацией двух видов альтруизма: направленного на «своего» и на «чужого». Полученный нами результат повышенной степени рассогласования у детей, предпочитающих более новые стратегии поведения – помощь «чужому», нежели у детей, чей выбор основан на более старых стратегиях – помощь «своему», можно объяснить в рамках той же логики: трудностью решения в пользу «чужого», так как эта стратегия, основанная на вновь сформированных системах, актуализация которых вступает в противоречие со старыми системами.

Работа выполнена при поддержке РГНФ (№ 15-06-10895-а) и в рамках исследовательской программы ведущей научной школы РФ «Системная психофизиология» (НШ-9808.2016.6).

Литература

1. *Александров Ю.И.* [*и др.*] Закономерности формирования и реализации индивидуального опыта // ЖВНД. 1997. Т. 47, № 2. С. 243–260.

2. *Александров Ю.И.* Дифференциация и развитие // Теория развития : дифференционно-интеграционная парадигма. М. : Языки славянских культур, 2009. С. 19–28.

3. *Баевский Р.М.* [*и др.*] Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем: (методические рекомендации) // Вестник аритмологии. 2001. Т. 24. С. 65–87.

4. *Бахчина А.В.* [*и др.*] Динамика вегетативной регуляции кардиоритма при стрессогенных когнитивных, эмоциональных и физических нагрузках // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2013. № 4. С. 14–22.

5. *Марков А.В.* Эволюция человека. II. Обезьяны, нейроны и душа. М. : Астрель : CORPUS, 2012. 512 с.

6. *Машин В.А.* Психическая нагрузка, психическое напряжение и функциональное состояние операторов систем управления // Вопросы психологии. 2007. Т. 6. С. 86–96.

7. *Резникова Ж.И.* Эволюционные и этологические аспекты общественного образа жизни у животных // Вестник ВОГиС. 2007. Т. 11, № 2. С. 290–306.

8. *Созинова И.М., Александров Ю.И.* Динамика нравственного отношения к представителям аутгрупп у российских детей 4–11 лет // Материалы конференции «Духовно-нравственное развитие подрастающего поколения как научно-теоретическая и прикладная проблема». 2014. Т. 1. С. 84–89.

9. *Созинова И.М.* [*и др.*] Нравственное отношение к «чужому» у детей 3–11 лет. Решение моральных дилемм: предубеждения и предпочтения // Теоретическая и экспериментальная психология. 2013. Т. 6, № 1. С. 44–57.

10. *Швырков В.Б.* Введение в объективную психологию. Нейрональные основы психики. М. : Институт психологии РАН, 1995. 162 с.

11. *Bruneau E.G.* [*et al.*] Parochial empathy predicts reduced altruism and the endorsement of passive harm // Social Psychological and Personality Science. 2017. P. 1–9.

12. *De Dreu C.K.* [*et al.*] In intergroup conflict, self-sacrifice is stronger among pro-social individuals, and parochial altruism emerges especially among cognitively taxed individuals // Frontiers in Psychology. 2015. V. 6. P. 1–9.

Особенности поведения мышей, селектированных по когнитивному признаку

А.Ю. Тарасова, И.И. Полетаева, О.В. Перепелкина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Когнитивное поведение животных – это сложный феномен, и исследование именно нейрогенетического аспекта этого поведения может значительно расширить наши представления о нем. Под термином «когнитивные способности животных» в настоящее время объединяют такие проявления пластичности поведения, как способность к обучению, формирование памяти, исследовательское поведение, реакция на новое, а также способность к решению элементарных логических задач [15]. Проявление таких признаков, естественно, обнаруживает значительную изменчивость, в которой можно выделить генетическую составляющую [14].

Реакцию животного на новый предмет или пищу также относят к категории когнитивных способностей животных [9]. Известно, что появление нового стимула вызывает у животного конфликт стремления к обследованию нового (исследовательского поведения) и избегания нового предмета [13], а сами тесты на распознавание нового предмета основаны на природном стремлении грызунов исследовать новые объекты [10]. В ситуации контакта с новым предметом у животного может также наблюдаться «неофобия» [16], при этом, однако, активируется внимание [17], рабочая [2] и эпизодическая память [8]. Ввиду того, что тесты на распознавание нового являются удобным экспериментальным приемом для оценки особенностей когнитивного поведения, их используют при анализе поведения различных групп животных: мышей [11], крыс [10], хомяков [17], морских свинок [12], собак [6] и обезьян [18]. Существуют разнообразные методы оценки уровня реакции на новизну у лабораторных животных. Общим для такого рода исследований является то, что животному предлагается выбрать между новым предметом / пищей и уже ранее знакомым. Предпочтение животным нового предмета рассматривается как неофилия [7], тогда как выбор более знакомого предмета – как неофобия (боязнь нового) [3]. Реакция на новизну у лабораторных животных зависит также от окружающей среды. В частности, показано, что лабораторные крысы больше предпочитали новый предмет в знакомой (не пугающей) среде по сравнению с незнакомой (пугающей) средой [4]. Показано, что реакция на новый предмет может определяться не только факторами, связанными с условиями проведения эксперимента, но и генотипом. Например, были получены мыши-нокауты по гену Narp, у которых испуг от контакта с новой пищей угасал значительно медленнее, чем у контрольной группы [5].

Другим проявлением когнитивных способностей является способность к экстраполяции направления движения стимула, исчезнувшего из поля зрения. Данная задача относится к категории элементарных логических задач, и ее решение проходит без предварительного научения. Показатели теста на экстраполяцию свидетельствуют о положительном (или отрицательном) решении задачи, связанной с необходимостью оперировать представлением о «неисчезаемости» стимула (мышь целенаправленно ищет скрывшуюся из поля зрения кормушку), а также с представлением о направлении перемещения стимула (т. е. «если проследовать в направлении движения корма, то его можно найти в соответствующей части камеры»). Ранее в лаборатории физиологии и генетики поведения (биофак, МГУ) была начата селекция мышей на высокие показатели способности к экстраполяции направления движения пищевого стимула, при одновременном отборе против проявлений тревожности в процессе решения этого теста. Оказалось, что в первых поколениях для мышей этой селектированной линии (ЭКС) был характерен более низкий уровень тревожности в тесте ПКЛ и более успешное решение теста на экстраполяцию по сравнению с мышами контрольной линии КоЭКС, однако к F12 устойчивых достоверных отличий между ЭКС и КоЭКС по этим признакам не обнаруживалось. Таким образом, был выявлен слабый ответ на селекцию по данному когнитивному признаку. В то же время оказалось, что мыши линии ЭКС достоверно успешнее решали другой когнитивный тест – на поиск входа в укрытие [1]. Таким образом, полученные результаты отражают сложную структуру когнитивного признака, ввиду чего для выявления более детальных различий между линией ЭКС и контрольной популяцией (КоЭКС) было проведено исследование еще одного когнитивного признака – реакции на новый предмет.

Исследование способности мышей линий ЭКС и КоЭКС к распознаванию нового предмета проводилось с использованием нескольких тестов. Один из них – тест в закрытом крестообразном лабиринте, состоящем из одного центрального и 4 прозрачных пластмассовых закрытых отсеков, в один из которых помещался незнакомый предмет. Оказалось, что мыши ЭКС (F15) достоверно чаще заходили в отсек, в котором находился новый предмет, и проводили там больше времени. После перемещения предмета в другой отсек в процессе второго тестирования наблюдалась сходная картина: частота подходов и длительность обследования нового предмета у мышей линии ЭКС были достоверно больше, чем у мышей КоЭКС.

При исследовании реакции на новый предмет в более крупной камере с тремя отсеками оказа-

лось, что самцы мышей ЭКС (F16) по сравнению с контрольными были достоверно более активны и чаще подходили к новому предмету и контактировали с новым предметом (который помещали вместо знакомого).

Для оценки реакции на новую пищу использовали тест на гипонеофагию. У голодного животного, попавшего в новую (но не пугающую) среду (небольшая арена), характерно проявление исследовательского поведения по отношению новой пище (сыр). У мышей КоЭКС наблюдалась выраженная боязнь новой пищи: они реже подходили к кормушке, проводили меньше времени около нее, съедали меньший объем пищи. В то же время мыши линии ЭКС (F17), селектированные по когнитивному признаку, потребляли новую пищу более активно и чаще подходили к ней.

Таким образом, несмотря на слабый ответ на селекцию (на способность к решению элементарной логической задачи экстраполяции направления движения пищевого стимула) у мышей селектируемой линии ЭКС на протяжении нескольких поколений селекции наблюдается более четко выраженное, чем у контрольной, исследовательское поведение, а также сниженная тревожность-осторожность по отношению к новому предмету, т. е. отсутствие неофобии. В то же время для мышей контрольной популяции КоЭКС было характерно избегание нового предмета и признаки неофобии. Вероятно, способность к решению задачи на экстраполяцию является сложной для выявления ее генетического определения. И селекция по данному признаку встретила трудности. Однако, как оказалось, мыши ЭКС и контрольная популяция КоЭКС имеют четкие различия по ряду других особенностей: по реакции на новизну и в решении когнитивного теста на поиск входа в укрытие.

Можно предположить, что именно эти особенности поведения мышей ЭКС стали результатом проведенного отбора. Успешность этого селекционного эксперимента подтверждается также нейроанатомическими различиями между мышами этих групп. Мыши ЭКС оказались более чувствительными к влиянию «обогащенных» условий среды, что проявилось не только в особенностях их поведения, но и в уровне нейрогенеза взрослого мозга в области гиппокампа.

Работа частично поддержана РФФИ (грант 04-13-00747; грант 16-04-01169 и тема N АААА16-11602166005-1).

Литература

1. *Перепелкина О.В.* [*и др.*] Селекция мышей на высокие показатели решения элементарной логической задачи // ДАН. 2015. Т. 460, № 5. С. 617–662.

2. *Aggleton J.P.* [*et al.*] The effects of hippocampal lesions upon spatial and non-spatial tests of working memory // Behav. Brain Res. 1986. V. 19. P. 133–146.

3. *Barnett S.A.* Experiments on ‘neophobia’ in wild and laboratory rats // Br. J. Psychol. 1958. V. 49. P. 195–201.

4. *Besheer J., Bevins R.A.* The role of environmental familiarization in novel-object preference // Behav. Processes. 2000. V. 50. P. 19–29.

5. *Blouin A.M.* [*et al.*] Narp knockout mice show normal reactivity to novelty but attenuated recovery from neophobia // Behav. Brain Res. 2013. V. 257. P. 178–181.

6. *Callahan H.* [*et al*.] Development of a protocol for studying object recognition memory in the dog // Prog. Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry. 2000. V. 24. P. 693–707.

7. *Cowan P.* The new object reaction of Rattus rattus L.: the relative importance of various cues // Behav. Biol. 1976. V. 16. P. 31–44.

8. *Eacott M.J., Norman G.* Integrated memory for object, place and context in rats: a possible model of episodic-like memory? // J. Neurosci. 2004. V. 24. P. 1948–1953.

9. *Ennaceur A.* One-trial object recognition in rats and mice: methodological and theoretical issues // Behav. Brain Res. 2010. V. 215, № 2. P. 244–254.

10. *Ennaceur A., Delacour J.* A new one-trial test for neurobiological studies of memory in rats. 1: behavioral data // Behav. Brain Res. 1988. V. 31. P. 47–59.

11. *Kim D.* [*et al*.] Variations in the behaviors to novel objects among five inbred strains of mice // Genes Brain Behav. 2005. V. 4. P. 302–306.

12. *Kornum B.R.* [*et al*.] The effect of the inter-phase delay interval in the spontaneous object recognition test for pigs // Behav. Brain Res. 2007. V. 181. P. 210–217.

13. *Montgomery K.C.* The relation between fear induced by novel stimulation and exploratory behavior // J. Comp. Physiol. Psychol. 1955. V. 48, № 4. P. 254–260.

14. *Paratore S.* [*et al*.] Early genomics of learning and memory: a review // Genes Brain Behav. 2006. V. 3. P. 209–221.

15. *Poletaeva I.I., Zorina Z.A.* A Genetic Approach to the Study of Simple Cognitive Abilities in Animals // Russ. J. Cogn. Sci. 2014. V. 1, № 3. P. 31–55.

16. *Powell S.B.* [*et al*.] The balance between approach and avoidance behaviors in a novel object exploration paradigm in mice // Behav. Brain Res. 2004. V. 152. P. 341–349.

17. *Thinus-Blanc C.* [*et al*.] The spatial parameters encoded by hamsters during exploration: a further study // Behav. Processes. 1992. V. 26. P. 43–57.

18. *Zola-Morgan S.* [*et al*.] Enhanced preference for perceptual novelty in the monkey after section of the fornix but not after ablation of the hippocampus // Neuropsychologia. 1983. V. 21. P. 433–454.

Кибернетическая парадигма манипуляций ребенка с игрушкой

В.В. Ткаченко, Г.В. Лосик, А.А. Дерюгин, М.К. Фатеев

Объединенный институт проблем информатики
НАН Беларуси, Минск, Беларусь
georgelosik@yahoo.com

Введение

В перцептогенезе ребенка важное место занимает процесс формирования признакового перцептивного пространства и процесс формирования образа. Многих исследователей интересует вопрос, какова очередность этих двух процессов. Так, например, Дж. Гибсон не умаляет отражательную функцию психики, но считает, что приоритет в перцептогенезе человека принадлежит не предметности восприятия, а позиционированию ребенком сначала самого себя со своими мотивами [1]. Такая схема противоречит схеме обучения компьютерной нейросетевой модели в кибернетике. Согласно психологическим данным последовательность этапов такая: перцептивная система ребенка подвергается антропологической детерминации с возникновением сначала оценочных шкал, а после этого подвергается детерминации объективным миром. Такая очередность подтверждается и физиологическими исследованиями. Так, согласно психофизиологической теории векторного кодирования первостепенной задачей считается поиск качественных отличий стимулов друг от друга, а амплитуды воспринимаемых стимулов считаются второстепенными [2]. Считается, что ребенку антропологически более важно сначала найти различия в окружающих явлениях, а не измерить их. В рамках векторной психофизиологии доказано, что мозг, сенсомоторные отделы зрительного, слухового, кожного анализаторов могут запоминать специфически пространственные характеристики предметов внешнего мира – через метод кодирования «местом возбуждения», а не измерением по шкалам [3]. Нейронные структуры могут формировать в физическом пространстве нейронов не только цепочки нейронов, но и топологически подобные внешним формам нейронные формы. В этом случае несходство форм или их подобие может своей локализацией в мозге хранить двоякую информацию: не только об объективных отличиях форм, но и, что существенно, о субъективном отношении к ним воспринимающего человека. Субъект как представитель вида кодирует в топологии нейронов ту или иную функцию этого запоминаемого явления, ту или иную «цель» действия с ним.

1. Антропологический аспект экологической информации

Антропологическую информацию о себе как виде человек выдает вовне через перцептивные воздействия на предметы вокруг себя. Для ребенка является полезной информация о вариативности объекта для формирования его образа с позиции кибернетики. Возникает вопрос, почему в филогенезе одни объекты используются человеком в быту, а другие объекты он не использует как вещи. Ребенок диагностирует выносливость игрушки: ее хрупкость, мягкость, пластичность, упругость, агрегатное состояние – через перцептивное воздействие на игрушку. В филогенезе, совершая перцептивное действие, человек оценивал, в каких приемлемых границах объект варьирует по форме от воздействия руки. Варьирует ли объект так, что, изменяясь, сохраняет за собой антропологическую функцию, нужную человеку? Одни объекты оказались очень твердыми, не приемлемыми для обработки, и поэтому они не сохранились в культурной практике человека. Это скалы, горные породы. Противоположную группу составляют объекты с сильно варьируемой формой. Закономерности их вариации трудно осваивать в онтогенезе. Закреплять за сильно изменчивыми объектами какую-то антропологическую роль человеку представляется ненадежным; поэтому в повседневную жизнь они также не взяты. Эмпирический опыт человека, и именно в виде перцептивного воздействия, был тем критерием, по которому в перцептогенезе человек сохранял некоторые вариативные предметы для своего видового пользования, а от некоторых отказался.

Одновременно перцептивное воздействие на вариативный по форме предмет информативно с точки зрения кибернетики для узнавания ребенком функции этого предмета. Перцептивное воздействие выступает у ребенка как инструмент двоякого предназначения. С одной стороны, от перцептивного воздействия предмет обнажает объективные параметры своей физики: прочность, агрегатное состояние, вязкость, упругость, пластичность. С другой стороны, через перцептивное действие субъект обнажает: а) свою цель пользоваться этим предметом, свою цель знать его и его антропологическую функцию для себя как вида; б) эргономику своего тела, руки, кинематику руки, шеи, корпуса; в) эргономику движений головы, хождения, свой рост. Именно эти параметры имел в виду Дж. Гибсон, когда называл свою теорию экологической [4].

2. Фактографические данные из онтогенеза ребенка

Подтвердим вышеописанные кибернетические положения фактами из перцептогенеза ребенка. Условно в поведении ребенка, когда он находится наедине с игрушкой, можно различать два режима. Первый – режим фокального внимания. В случае, если фокальный вид внимания доминирует над амбиентным (Б.М. Величковский), то ребенок

возится с одной-единственной игрушкой. В игре выполняется строгое условие кибернетической модели перцептивного действия. Так, для получения видеоинформации для глаз об изменении вида игрушки до и после воздействия на нее рукой ребенок изгибает игрушку. Он изгибает ее сам, своей рукой в условиях отсутствия иных воздействий. Это режим игры, когда фокальное внимание у ребенка оказывается главным.

Существует другой режим игры ребенка, когда главным оказывается работа амбиентного внимания. При таком внимании охватывается широкая сцена и взор ребенка следит не за одним находящимся на месте предметом в его руке, а за переносом игрушки с одного места в другое, третье. Этот перенос ребенок, опять-таки, совершает собственноручно. В этом случае образуется сектор обзора, в котором шея, туловище, глаза своими движениями обеспечивают фокус на одной игрушке, но на фоне ряда мелькающих за ней иных, второстепенных для этого момента, игрушек. Фокальное внимание выполняет далее функцию зрительной оценки того, не уронил ли ребенок объект. Отбираемые жесты в будущем могут меняться по амплитуде, но по вектору действия каждый жест проверяется на «психологическую совместимость» с другими жестами из алфавита. Степени свободы вариативности жеста передаются строго при собственноручном воздействии ребенка на перемещающийся в пространстве предмет. При этом моторная кора самообучается, формируя командные нейроны. В сенсорной коре существуют нейроны-предетекторы. Они делают детекторы нечувствительными к амплитуде стимула. Зато возрастает чувствительность к качеству стимула, к несходству стимулов по качеству. Измерение объективного параметра стимула заменяется измерением активности субъекта. Точно так же для отобранных моторных жестов переноса игрушки в моторной коре формируются *прекомандные* нейроны, аналогичные предетекторным. Прекомандеры делают командный нейрон носителем качества жеста, а сила жеста, его амплитуда в такой азимутно-векторной модели при его кодировании не шифруется. Физические качества жестов заменены азимутными так, что различие или близость жестов кодируются азимутным углом.

Нами показана важность панорамного (амбиентного) и фокального внимания ребенка к игрушке. С помощью двух рассмотренных режимов игры ребенка с игрушкой (изменение формы предмета и его переносы) происходит отсев антропоудобных и неудобных объектов для последующего использования.

В этом процессе отсева выдерживают испытание объективные параметры тел. Но одновременно с процессом отбора объективных параметров окружающего материального мира выполняется процесс отсева, отбора видовых, антропологических интенций ребенка, видовых целей, которые планово, с помощью «зоны ближайшего развития» геном ребенка в онтогенезе провоцирует реализовать сенсорику и моторику независимо от объективного окружения сеанса игры. Таким образом, мы приходим к выводу, что за счет генетических инициатив перцептивных действий ребенок формирует признаковые шкалы. Среди объективных свойств окружающих ребенка вещей содержится множество антропологически не нужных ему свойств. Они объективно присущи материальным вещам. Но обыденное «образное сознание» человека не обременяет себя их знанием и использованием.

3. Формализация сеанса игры ребенка с игрушкой с позиции нейросетей и понятия учебной выборки $X_{уч}$

Строго говоря, проанализировав так игру ребенка, следует изменить принятую в кибернетике трактовку *цели* обучения нейросети. Принято считать, что учитель ставит перед нейросетью задачу формировать эталон каждого объекта, разнести эталоны в пространстве их объективных признаков. Но в случае манипуляции ребенка игрушкой, как мы показали, верна принципиально иная модель – Дж. Гибсона и Е.Н. Соколова. А именно: первоначально у ребенка формируется система шкал, измерительных признаковых осей. В случае ребенка, а не нейросетевой модели реализуется цель не обогащения образа все более отличающими его деталями, а выбора для некого множества тел адекватных их природе шкал признакового пространства. Если формировать сначала шкалы, а не образ, то ими как инструментами можно впоследствии занести в образ информацию о видовой цели человека. Эта информация задается у ребенка геномом как видовая функция, которую антропология человека навязывает конкретной группе функционально похожих объектов восприятия, группе действий с ними. Это информация антропологической, видовой природы. Она закладывается в нейронные структуры на ранних стадиях перцептогенеза, на стадиях формирования шкал. И затем искривляет в нужную сторону объективные параметры воспринимаемых объектов. В итоге на весь будущий период жизни ребенка в этих шкалах, а затем и в образах предметов в психике оказывается запечатленной как объективная, так и субъективная информация. Первая – о материальных свойствах предметов, вторая – о том, зачем они были нужны и будут нужны именно этому виду особей. Следовательно, еще до начала когнитивного процесса закладки образов у ребенка идет генетический процесс закладки шкал. То есть имеет место принципиально обратная картина, нежели в настоящее время в обучении нейросетевых моделей.

4. Психологические феномены, доказывающие, что шкалы формируются раньше образов

Известна педагогическая система Марии Монтессори, которая сохранилась в педагогике и сегодня и является доказательством того, что сенсорное научение целесообразно проводить с детьми до предметного научения. Таким же доказательст-

вом является закон «зоны ближайшего развития», разработанный и предложенный Л.С. Выгодским. Согласно ему не всякие образы, понятия, поведенческие приемы ребенок может освоить без созревания генетических уровней. Даже при самом опытном учителе и богатой учебной выборке обучение ребенка становится невозможным без предварительного развития шкал. В области слухоречевого развития ребенка известна система, открытая В.И. Бельтюковым. Согласно ей в развитии фонематического слуха и артикуляционных навыков ребенка работает строгая очередность биологического развития.

5. Отбор двигательных эталонов

После того как у ребенка оказываются сформированными сенсорные шкалы и сенсорные образы базового набора окружающих его предметов, начинается формирование набора движений с предметами. Возникает вопрос, по какому критерию действия руки закрепляются в памяти ребенка, а какие не запоминаются. Так, при переносе предмета с места на место ребенок этот предмет берет, переносит и кладет. Он запоминает те цепочки разных действий, в которых сохраняется преемственность. Если некоторая цепочка действий соединила действия так, что предмет не роняется, не разрушается физически, если по эстафете предмет может передаваться от действия к действию, то такие действия становятся универсальными для разных эстафет, для разных предметов. Именно зрение позволяет ребенку контролировать успешность очередного действия в цепочке, санкционировать следующее действие. Зрение также участвует в отсеве действий, если ребенок видит, что совершенное им пробное действие, например, разрушило предмет, уронило предмет, создало паузу в передаче. В итоге благодаря такому контролю происходит отсев эргономически неудачных попыток ребенка реализовать цепь действий. А приемлемые действия, в свою очередь, разбиваются на группы по принципу «психологической совместимости» друг с другом в группе.

При отборе и закреплении движений ребенок опосредованно вкладывает в нейронную модель того или иного жеста степени свободы своей руки. У ребенка в таком возрасте мы имеем дело только с когнитивными действиями. В его возрасте у ребенка еще нет трудовой деятельности, и инструментальные действия он не осваивает. В усвоении стереотипных действий, отсеве нестереотипных действий важную роль играет антропологическое сходство строения руки, туловища, артикуляционного аппарата у представителей одного вида. Ребенок отсеивает неудачные двигательные жесты на основе своего личного опыта их применения, а не подражая взрослым, как принято считать. Благодаря видовому сходству строения руки, туловища, их кинематики у ребенка и у взрослого результат самообучения будет подобен для всех детей как представителей одного вида.

Выводы

1. В раннем перцептогенезе ребенка с точки зрения кибернетики имеется, наряду с основным, скрытый канал поступления дополнительной обучающей информации. Она поступает к ребенку не от взрослого, а от генома. Ребенок может совершать самообучение путем реализации заложенного в геном «алгоритма» совершения перцептивного воздействия на предмет. Не от взрослых, как принято считать, а сугубо из своего эксперимента с окружающими предметами ребенок дополнительно узнает, какие предметы и действия с ними перспективны для него в будущем, а какие не перспективны.

2. С точки зрения кибернетики целесообразны не существующие алгоритмы обучения нейросетей, а алгоритмы, используемые ребенком в манипуляции игрушками. А именно: до стратегии обогащения образа у ребенка сначала формируются в сенсорной системе шкалы для интегрального различения целого набора объектов. А в моторной системе – набор интегральных команд для совершения типовых действий с группами объектов. Игра ребенка с набором сравнимых объектов нацелена не на обогащение образа объекта, а на выявление закономерностей трансформации формы объектов.

3. Экологическая теория восприятия Дж. Гибсона получает развитие в рамках теории перцептивных действий В.А. Запорожца. Ребенок совершает цепь перцептивных воздействий на игрушки не только с целью изучения их, а и с целью изучения степеней свободы своей руки и туловища. Благодаря этому в перцептогенезе совершается отбор объектов для повседневной жизни ребенка: предпочитаются те, которые в игре ребенка выдерживают его антропологические степени свободы, не разрушаются. Аналогично в игре совершается отбор действий руки с объектами. Закрепляются в моторной памяти те действия, которые способны передавать по эстафете друг другу не разрушенный объект. Таким образом, у ребенка реализуются два критерия кибернетической образной связи: первый – для отбора объектов и второй – для отбора действий для самообучения.

Литература

1. *Гибсон, Дж.* Перцептивное научение – дифференциация или обогащение? / Дж. Гибсон, Э. Гибсон // Хрестоматия по ощущению и восприятию. – М. : МГУ, 1975. – С. 181–197.

2. *Соколов, Е.Н.* Принцип векторного кодирования в психофизиологии / Е.Н. Соколов // Вестник МГУ. Сер. 14, Психология. – 1995. – № 4. – С. 3–13.

3. *Соколов, Е.Н.* Очерки по психофизиологии сознания / Е.Н. Соколов. – М. : МГУ, 2010. – 254 с.

4. *Гибсон, Дж.* Экологический подход к зрительному восприятию / Дж. Гибсон. – М. : Прогресс, 1988. – 410 с.

Формирование персонального информационного образа с помощью системы Alterozoom

А.Л. Умнов

ООО «Лаборатория мобильных сервисов»

Проблема влияния современных информационных технологий на человека и общество, несомненно, является актуальной, но при этом находится большей частью в фокусе внимания публицистики, а не науки. Среди ярких публицистических работ, привлекших внимание к проблеме, следует отметить статью Николаса Карра «Делает ли Гугл нас глупее» [1], появившуюся почти десять лет назад. Автор анализирует влияние интернет-технологий на современного человека: его память, способность к концентрации, способность к чтению и пониманию длинных текстов, умение интерпретировать текст, строить смысловые связи и т. п.

Н. Карр утверждает, что все эти способности деградировали из-за массового использования интернет-технологий. Данное утверждение выглядит правдоподобным, но до настоящего момента не было убедительно проверено экспериментально. Одной из главных причин отсутствия экспериментальной проверки подобного рода утверждений является отсутствие инструментов, пригодных для организации качественного исследования. Связано это с тем, что подобный инструмент должен соответствовать ряду довольно трудновыполнимых требований.

Инструмент должен:

1) быть полезен человеку для накопления больших объемов экспериментальных данных и применим в ходе его повседневной интеллектуальной деятельности в течение длительного времени, а также иметь массовое распространение;

2) обладать богатым набором функций, позволяющим по-разному организовывать работу с информацией, что, с одной стороны, должно способствовать его массовому распространению, а с другой стороны – обеспечивать необходимую полноту экспериментальных условий;

3) иметь набор средств диагностики и анализа, которые позволяют получать количественные данные о психофизических параметрах человека в привязке к его образу жизни в конкретной окружающей его обстановке, наполненной множеством вещей, с которыми он ежедневно взаимодействует;

4) позволять отслеживать паттерны поведения человека и его конкретные действия;

5) иметь встроенные средства диагностики когнитивных функций пользователя.

Следует отметить, что важным требованием, предъявляемым к данному инструменту, является требование обеспечения конфиденциальности – человек, участвующий в исследовании, должен быть абсолютно уверен в том, что все собираемые данные находятся под его полным контролем и не могут быть использованы без его разрешения и ему во вред.

Очевидными кандидатами на роль средств, позволяющих строить персональный информационный образ человека и исследовать влияние на него информационных технологий, являются поисковые сервисы, социальные сети и блог-платформы, которые выполняют анализ поведенческих паттернов и интересов конкретного пользователя и предоставляют ему релевантную, с их точки зрения, информацию. Однако эти сервисы не столько адаптированы под потребности человека и служат его интересам, сколько настроены на эффективное манипулирование им с учетом его персональных особенностей для показа релевантной рекламы, при этом алгоритмы работы этих сервисов и собираемые ими данные, являются закрытой информацией, которая не доступна вне рамок компаний, которым они принадлежат. Кроме того, среди перечисленных сервисов на настоящий момент отсутствуют решения, позволяющие массово собирать данные о взаимодействии человека с окружающими его в повседневной обстановке вещами, а также фиксировать его действия и психофизическое состояние.

В рамках ООО «Лаборатория мобильных сервисов» предпринята попытка создать программно-аппаратную платформу, которая могла бы лечь в основу инструмента, обладающего всеми перечисленными выше необходимыми свойствами.

Разрабатываемая платформа Alterozoom (www.alterozoom.com), с одной стороны, является инструментом, помогающим человеку повысить эффективность своей повседневной интеллектуальной деятельности, а с другой стороны, может быть использована им для сбора максимально возможного объема информации о самом себе. Платформа позволяет пользователю работать как с виртуальными информационными объектами, так и с «умными» вещами [2].

Повышение эффективности повседневной интеллектуальной деятельности достигается за счет предоставления пользователю:

- инструментов, позволяющих сохранять в систематизированном виде информацию, поступающую из различных источников, а также создаваемую самим пользователем (систематизация осуществляется с помощью гибкой иерархической системы категорий, а также разметкой всей информации с помощью метатегов);
- инструментов, позволяющих работать с информацией, используя различные методы организации процесса мышления (формирование определенной последовательности мыслительных операций, фиксация мыслей, визуализация идей и т. п.);

- больших объемов справочной информации, очищенной от рекламного шума;
- набора курсов и тренингов, формирующих необходимые навыки работы с информацией;
- органайзера, задающего режимы работы и отдыха с учетом самочувствия пользователя;
- интерфейсов к «умным» вещам.

Формирование персонального информационного образа достигается:

- накоплением различных информационных объектов, отбираемых и создаваемых человеком в процессе естественной, привычной, повседневной деятельности, которые характеризуют круг его интересов;
- формированием фонового диалога «система – человек», в котором используются вопросы, тесты и т. п.;
- оценкой психофизических параметров человека в привязке к виду выполняемой работы с использованием носимых сенсорных устройств, а также приборов домашней медицины;
- фиксацией поведенческих паттернов при работе за компьютером;
- регистрацией поведенческих паттернов при взаимодействии человека с окружающими его объектами.

Платформа имеет в своем составе «умные» устройства, снабженные специальным программным обеспечением, локальные серверы, осуществляющие сбор, локальное хранение и анализ данных, поступающих с устройств, программное обеспечение для компьютера, позволяющее пользователю организовать свое персональное рабочее пространство для повседневной интеллектуальной деятельности, облачный сервис, интегрирующий множество персональных локальных систем и предоставляющий ряд возможностей по хранению и анализу данных.

В настоящее время в платформе Alterozoom реализован широкий набор функций, позволяющих пользователю эффективно работать с информацией, представленной в мультимедийных документах, а также реализовано подключение системы к распределенной сети измерительных приборов. Система позволяет организовывать как локальные сервисы, ориентированные на одного пользователя или небольшую группу пользователей, так и географически распределенные сервисы, позволяющие предоставлять услуги и собирать информацию от большого числа разнородных групп пользователей. Возможности локального анализа данных позволяют реализовывать сервисы с высокой степенью конфиденциальности, предоставляющие их пользователю возможности самоанализа. Централизованный сбор информации позволяет накапливать и анализировать большие данные (каждый пользователь сам определяет объем данных, предоставляемых для централизованного сбора).

Исследование влияния информационных технологий на человека с помощью инструментов, созданных на базе разрабатываемой платформы, может производиться как путем сбора и последующего анализа данных о взаимодействии человека с теми или иными существующими программными и аппаратными средствами, которые человек регулярно использует в своей деятельности, так и с помощью целенаправленного создания новых средств, обладающих определенными свойствами, влияние которых на человека планируется изучить.

Сервис находится в стадии тестирования и доработки. Основные усилия в ближайшее время будут направлены на формирование удобных окружающих человека в повседневной деятельности сред, предоставляющих пользователю локальные услуги и при этом осуществляющих диагностику самого пользователя. Для внешних разработчиков доступны API, что позволяет использовать платформу Alterozoom независимым исследователям.

Литература

1. *Carr N.* Is Google Making Us Stupid? // The Atlantic. 2008. V. 301.

2. Internet of things – converging technologies for smart environments and integrated ecosystems / Edited by O. Vermesan and P. Friess. River Publishers, 2013.

Информационная значимость хиазмы зрительных путей

В.А. Утробин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
utrobin-va@yandex.ru

Одним из важнейших элементов зрительного восприятия является глубинное зрение – восприятие пространственных отношений. Точность глубинного зрения определяется фактором бинокулярного зрения и прямо зависит от врожденной организации зрительной системы. Бинокулярное зрение, в свою очередь, наделено функциями слияния воедино изображений одного и того же объекта, проецируемого на сетчатки двух глаз, и стереовосприятия рельефа объекта, его пространственной формы. Первая функция предполагает:

- синхронность движения глаз с возможностью такой их фиксации (конвергентной установки), что изображения на сетчатках правого и левого глаза падают на соответствующие (корреспондирующие, координатно-соответствующие) точки. Результатом является четкая видимость изображения одного объекта. Уже на данном этапе реализации машинного зрения возникает проблема надежного выделения объекта либо его элемента из фона как точки фиксации [1];
- наличие перекрытия полей зрения глаз и объективный фактор существования «своих» подобластей зрения.

Вторая функция – собственно процесс стереовосприятия, базируется на процессе стереопсиса – реакции зрительной системы на диспарантность: если изображение предмета проецируется на несоответствующие (диспарантные) точки сетчатки, то в зависимости от диспарантности (бинокулярного параллакса) реализуется стереовосприятие либо двоение объекта. Результатом стереопсиса является восприятие относительной удаленности – удаленности объекта (либо его элементов) относительно фронтальной плоскости, проходящей является восприятие относительной удаленности – удаленности объекта (либо его элементов) относительно фронтальной плоскости, проходящей через точку бинокулярной фиксации пересечения главных зрительных осей глаз. При этом чем более разнесены глаза друг относительно друга, тем выше диспарантность и тем глубже в пространстве (по направлению луча зрения наблюдателя) реализуется процесс бинокулярного стереовосприятия.

Изображение, наблюдаемое в поле зрения двух глаз (рис. 1), прежде чем отобразиться на сетчатке, претерпевает преобразование типа ***пространственного поворота*** в хрусталиках глаз (как линзах). Далее, по направлению передачи данных, в хиазме реализуется ***разветвление (частичное) зрительных путей с проектированием на поля*** (и слои, на которых предполагается реализация процесса бинокулярного слияния [2]) нижнего коленчатого тела (НКТ). Критерием разветвления и проектирования является полное соответствие относительного положения точек изображения на сетчатке и последующих полях зрительной системы (топический принцип организации).

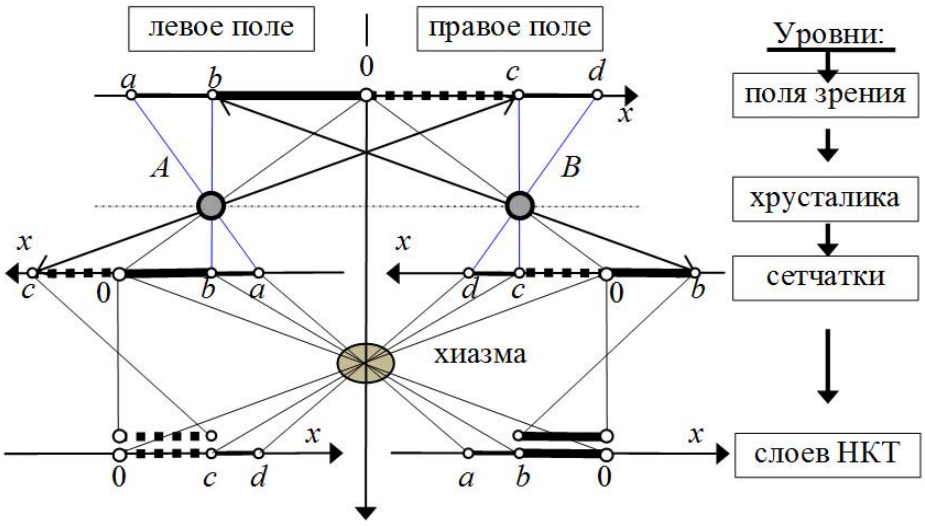


Рис. 1. Координатные преобразования в нижних уровнях зрительной системы: *A*, *B* – левый, правый глаз; 0 – точка наведения глаз; *ab*, *cd* – индивидуальные, недоступные другому глазу поля зрения; 0*b*, 0*c* – линии (сплошная и пунктирная), выделяющие общедоступные поля

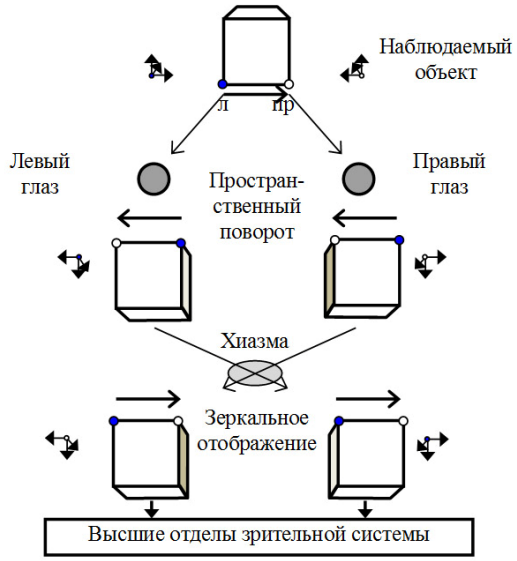


Рис. 2. Координатно-информационные преобразования на нижних уровнях системы зрительного восприятия

Таким образом, по ходу зрительных путей реализуются два типа преобразований системы координат (рис. 2): первое – в хрусталике – пространственный «поворот»; второе – в хиазме.

Второе преобразование реализуется путем «разборки» поля зрения (см. рис. 1) на подполя и передачи части подполей «своему» и «не своему» каналу обработки зрительной информации. При этом для обеспечения топического принципа организации при передаче должно реализоваться преобразование типа пространственного поворота. В результате, во-первых, отношение левого-правого совпадает с таковым для наблюдаемого объекта (на рис. 2 показано горизонтальными стрелками). Во-вторых, проекция левого глаза оказалась перевернутой и справа, а проекция правого глаза – перевернута и слева. Поскольку направление верх-низ (перевернутое в хрусталике) сохранилось, то имеем зеркальное отображение, реализуемое по оси x. Отсюда следует, что преобразование пространственного «поворота» – зеркальное отображение, реализуемое в хиазме, есть «***поворот в четвертом измерении***», так как не может быть реализован никакими преобразованиями в E^3.

В этом и заключается, с нашей точки зрения, информационная роль хиазмы зрительных путей [3].

Литература

1. *Марр, Д.* Информационный подход к представлению и обработке зрительных образов у человека / Д. Марр. – М. : Радио и связь, 1987. – 402 с.

2. Элементы теории биологических анализаторов / под ред. Н.В. Позина. – М. : Наука, 1978. – 360 с.

3. *Утробин, В.А.* Компьютерная обработка изображений. Основы специальной теории восприятия : монография / В.А. Утробин ; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2015. – 517 с.

Об эффективности биоэлектрического управления в интерфейсе «мозг – компьютер»

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

[1] Институт биофизики клетки РАН, г. Пущино, Московская область
[2] Нижегородская государственная медицинская академия

Интерфейсы «мозг – компьютер» (ИМК) являются компьютерными информационно-управляющими системами, которые опосредуют сигнализацию между мозгом и различными технологическими устройствами. Согласно формальному определению, ИМК – это система, измеряющая активность мозга и преобразующая ее в искусственный выходной сигнал, который заменяет, восстанавливает, усиливает, дополняет, информирует или улучшает естественный выходной сигнал и таким образом изменяет текущие взаимодействия мозга с внешней или внутренней средой [1]. К настоящему времени ИМК считается одной из самых многообещающих технологий в области лечения неврологических заболеваний и травм [2], при разработке тренажерных, коммуникационных и ассистирующих комплексов с возможностью управления ими без мышечных усилий на основе расшифровки мысленных команд в ЭЭГ у пациентов с тяжелыми нарушениями двигательной системы и речи [3], а также при амбулаторном мониторинге, дополнении и восстановлении когнитивных или сенсорно-моторных функций человека [4].

Началом развития технологии ИМК считается 1971 год, когда Жак Видаль предложил термин «brain-computer interface» и изложил план экспериментальных исследований по взаимодействию человеческого мозга с компьютером [5]. Однако есть все основания утверждать, что основой данного направления послужила методология биоэлектрического управления (БУ), которая сформировалась в 50–60-е годы прошлого столетия и активно развивается в наши дни. Она предполагает использование биоэлектрических потенциалов, генерируемых тканями или органами человека, для автоматического управления различными внешними устройствами [6]. Ярким примером данного направления является пионерская работа Н.П. Бехтеревой, показавшая, что ритмическая световая стимуляция, автоматически управляемая электрическими сигналами мозга пациента, приводит к росту представленности альфа-ритма ЭЭГ и является более эффективным видом функциональной нагрузки, чем обычные виды фотостимуляции [7]. Впоследствии разные варианты данного приема были использованы в целом ряде зарубежных исследований, где он получил названия «EEG-driven photic stimulation» или «alpha power dependent light stimulation» [8–10].

Несмотря на повышенный интерес и экспоненциальный рост публикаций, в исследованиях ИМК и БУ существует ряд проблем, требующих своего решения. Одной из центральных является проблема оптимальной организации сигналов обратной связи как важнейшего фактора, определяющего успешность биоуправления. Однако в литературе отмечается полное отсутствие сравнительных данных об эффективности того или иного вида и временных параметров обратной связи, используемой разными исследователями [11]. Кроме того, подчеркивается крайняя малочисленность и острая необходимость проведения строго контролируемых исследований для выявления эффективности используемых вариантов ИМК и БУ [12].

В данной работе представлены результаты строго контролируемых экспериментов, направленных на выяснение роли временных параметров обратной связи в эффективности ИМК. В частности, у одних и тех же испытуемых проведено сравнение эффектов двух процедур биоэлектрического управления от ЭЭГ, в которых сигналы обратной связи подавались с короткой и длительной задержкой. В качестве экспериментального подхода использован упомянутый выше вариант ИМК [7], в котором биопотенциалы мозга субъекта автоматически управляют процессом фотостимуляции. Цель исследования состояла в выявлении зависимости эффективности биоэлектрического управления от величины задержки управляющих ЭЭГ сигналов обратной связи.

Метод

В одном из двух обследований 15 испытуемым-добровольцам предъявляли световые воздействия, получаемые в реальном времени путем прямой трансформации ЭЭГ в светодиодные мелькания. Это достигалось путем нормирования в реальном времени оцифрованных значений ЭЭГ, при котором наибольшая отрицательная величина сигнала соответствовала минимальному, а наибольшая положительная величина – максимальному свечению светодиодов. В этом случае задержка обратной связи была минимально возможной (приблизительно 0,01 с) и была обусловлена аппаратными преобразованиями ЭЭГ в световые сигналы. В другом обследовании того же испытуемого нормирование и преобразование ЭЭГ в светодиодные мелькания осуществлялось с задержкой, равной 2,56 с. Иными словами, если в первом случае световые воздействия модулировались ЭЭГ субъекта практически сразу после ее регистрации, то во втором случае световые мелькания управлялись ЭЭГ-характеристиками, зарегистрированными у испытуемого за 2,56 с до воздействия. С целью определения возможных механизмов исследуемых процессов проведен сравни-

тельный анализ ЭЭГ-эффектов и субъективных показателей двух обследований.

В начале каждого обследования для оценки исходного психофизиологического состояния испытуемых проводился их краткий опрос и начальное тестирование с помощью двух ранее использованных нами стандартных тестов – теста «САН», в котором испытуемые дают оценку текущего самочувствия, активности и настроения, и теста «УЭД», позволяющего определять текущий уровень эмоциональной дезадаптации [13]. Затем устанавливали ЭЭГ-датчики (активный электрод в отведении Cz, референтный и заземляющий – на мочках ушей) и очки, в затемненные линзы которых были вмонтированы красные светодиоды с мощностью, не превышающей 100 мкВт. Испытуемых просили сидеть спокойно, с закрытыми глазами в течение всей процедуры.

Эксперимент начинался с 30-секундной записи фоновой электрической активности при диапазоне фильтрации ЭЭГ 2–32 Гц и частоте дискретизации сигналов 100 Гц. Затем на 10 мин включался рабочий режим, где испытуемым предъявлялись варьирующие по интенсивности светодиодные воздействия. При проведении процедур фотостимуляции учитывались современные рекомендации Европейской противоэпилептической лиги [14]. По окончании каждого эксперимента испытуемых расспрашивали об отмеченных эффектах, а также повторно проводили тестирование с помощью тестов «САН» и «УЭД». Статистическую обработку результатов проводили с помощью пакета программ Origin 6.0. Вычисляли средние для групп значения (M), стандартные ошибки (m) и критерий t Стьюдента. Для результатов, полученных в динамике на одной группе (сдвиги показателей во время и после воздействия относительно исходного фона), критерий t вычисляли по формуле $t = M/m$.

Результаты

При анализе исходных значений ЭЭГ выяснилось, что они характеризуются значительными индивидуальными различиями. Поэтому для определения ЭЭГ эффектов воздействий для каждого эксперимента были вычислены сдвиги мощности ЭЭГ-ритмов во время и после стимуляции (в процентах) относительно фоновых значений, принятых за 100 %.

Анализ показал, что только при минимальной задержке управляющих сигналов отмечается достоверный рост выраженности основных ритмов ЭЭГ во время воздействий. Соответствующие значения сдвигов мощности тета-, альфа- и бета-ритмов ЭЭГ относительно фона составили (7,0 ± 2,6) %, (8,7 ± 3,3) % и (13,5 ± 3,8) %. При максимальных задержках обратной связи во время воздействий сдвиги мощности ЭЭГ-ритмов были недостоверными и составили (2,5 ± 1,8) %, (4,5 ± 3,3) % и (6,9 ± 3,5) % соответственно. Важно подчеркнуть, что при минимальных задержках после прекращения фотостимуляции мощность ритмов ЭЭГ сохраняла значения, превышающие исходный уровень, тогда как в случае длительных отставлений обратной связи (на 2,56 с) после отмены стимуляции происходило падение мощности ЭЭГ до или ниже исходного уровня.

Расспрос испытуемых о субъективных ощущениях во время фотостимуляции показал, что два использованных вида воздействий характеризовались некоторыми особенностями их восприятия через закрытые глаза. При предъявлении мельканий, управляемых ЭЭГ с минимальной задержкой, большинство испытуемых сообщали о приятных переливах разноцветного фона, как бы вовлекающих их в калейдоскоп образов. При максимальной задержке обратной связи испытуемые, как правило, не сообщали о каких-либо выраженных эмоциональных реакциях. Анализ результатов психологического тестирования испытуемых также показал, что достоверные позитивные изменения показателей тестов «САН» и «УЭД» после процедуры относительно начального уровня наблюдаются только в экспериментах с минимальной задержкой сигналов обратной связи. При максимальных задержках отмечены лишь небольшие сдвиги этих показателей относительно исходного состояния.

Обсуждение

Таким образом, значимые сдвиги объективных и субъективных показателей состояния наблюдаются только при минимальных задержках обратной связи, т. е. в случаях, когда управление световыми воздействиями осуществляется непосредственно регистрируемыми ЭЭГ характеристиками испытуемых. В этих случаях отмечается существенный рост мощности всех ритмов ЭЭГ относительно фона, который сохраняется и после отмены световой стимуляции. Судя по результатам опроса и психологического тестирования, такие воздействия сопровождаются позитивными эмоциональными реакциями и сдвигами функционального состояния испытуемых.

Ранее нами отмечались преимущества сенсорных воздействий, которые автоматически в реальном времени управляются сигналами обратной связи от биопотенциалов мозга субъекта. Такая обратная связь обеспечивает прямое взаимодействие подаваемых стимулов с различными системами организма благодаря соответствию параметров стимуляции резонансным и адаптационным свойствам ЦНС индивида [15]. Экспериментально доказано, что автоматическая настройка резонансной стимуляции на эндогенную ритмическую активность мозга пациента обеспечивает возможность быстрой и эффективной коррекции неблагоприятных сдвигов его функционального состояния [16]. Полученные в настоящем исследовании результаты также обусловлены, на наш взгляд, механизмами резонансного взаимодействия между внешними ритмическими раздражениями и биоэлектрическими процессами мозга человека.

Известно, что ритмическая фотостимуляция с частотами эндогенных ЭЭГ-ритмов вызывает резонансные ответы зрительных областей коры по

механизму вовлечения (захвата фазы) осцилляций биопотенциалов мозга ритмическими сенсорными раздражениями и сопровождается выраженными поведенческими эффектами [17]. При минимальных задержках обратной связи эти процессы развиваются особенно успешно, что подтверждается достоверным ростом мощности ЭЭГ-ритмов и результатами опроса испытуемых. При введении задержек обратной связи генерация и предъявление световых мельканий осуществляется на основе ЭЭГ-характеристик, зарегистрированных за 2,56 с до этого, что значительно снижает эффективность их резонансного взаимодействия с текущими биопотенциалами мозга. В результате в условиях длительных задержек обратной связи как изменения ЭЭГ, так и сдвиги субъективных показателей характеризуются незначительными величинами.

Следует подчеркнуть, что предпринятое исследование с полным основанием может считаться строго контролируемым. При полной идентичности всех экспериментальных условий единственным отличием двух обследований одних и тех же испытуемых было наличие или отсутствие задержки сигналов обратной связи. Результаты исследования однозначно свидетельствуют, что при создании современных нейроинтерфейсов следует стремиться к минимизации задержек обратной связи. Полученные данные могут быть использованы для разработки перспективных методов системного воздействия с помощью ИМК, направленных на своевременное устранение функциональных нарушений, возвращение организма человека к оптимальному состоянию и его когнитивную реабилитацию.

Работа выполнена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда (гранты 15-06-10894 и 16-06-00133).

Литература

1. *Daly J.J., Huggins J.E.* Brain-computer interface: current and emerging rehabilitation applications // Arch. Phys. Med. Rehabil. 2015. V. 96, Suppl. № 3. P. S1–S7.

2. *Левицкая О.С., Лебедев М.А.* Интерфейс «мозг – компьютер»: будущее в настоящем // Вестн. рос. гос. мед. унив. 2016. № 2. С. 4–16.

3. *Каплан А.Я.* Нейрофизиологические основания и практические реализации технологии мозг-машинных интерфейсов в неврологической реабилитации // Физиология человека. 2016. Т. 42, № 1. С. 118–127.

4. *Wood G., Kober S.E., Witte M., Neuper C.* On the need to better specify the concept of “control” in brain-computer interfaces/neurofeedback research // Front. Syst. Neurosci. 2014. V. 8, № 171. P. 1–4.

5. *Vidal J.J.* Toward direct brain-computer communication // Annu. Rev. Biophys. Bioeng. 1973. V. 2. P. 157–180.

6. *Гурфинкель В.С., Малкин В.Б., Цетлин М.Л., Шнейдер А.Ю.* Биоэлектрическое управление. М. : Наука, 1972. 244 с.

7. *Бехтерева Н.П., Усов В.В.* Методика прерывистой фотостимуляции в ритме собственных потенциалов мозга при регистрации ЭЭГ // Физиол. журн. СССР. 1960. Т. 46, № 1. С. 108–111.

8. *Kumano H., Horie H., Shidara T.* [*et al.*] Treatment of a depressive disorder patient with EEG-driven photic stimulation // Biofeedback Self-Regul. 1996. V. 21, № 4. P. 323–334.

9. *Kamei T.* Use of photic feedback as an adjunct treatment in a case of Miller Fisher syndrome // Percept. Mot. Skills. 2000. V. 90, № 1. P. 262–264.

10. *Woertz M., Pfurtscheller G., Klimesch W.* Alpha power dependent light stimulation: dynamics of event-related (de)synchronization in human electroencephalogram // Brain Res. Cogn. Brain Res. 2004. V. 20, № 2. P. 256–260.

11. *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.

12. *Gruzelier J.H.* EEG-neurofeedback for optimising performance. III: A review of methodological and theoretical considerations // Neurosci. Biobehav. Rev. 2014. V. 44, № 2. P. 159–182.

13. *Федотчев А.И., Бондарь А.Т., Бахчина А.В., Григорьева В.Н., Катаев А.А., Парин С.Б., Полевая С.А., Радченко Г.С.* Трансформация ЭЭГ-осцилляторов пациента в музыкоподобные сигналы при коррекции стресс-индуцированных функциональных состояний // Современные технологии в медицине. 2016. Т. 8, № 1. С. 93–98.

14. *Kasteleijn-Nolst T.D., Rubboli G., Hirsch E.* [*et al.*] Methodology of photic stimulation revisited: updated European algorithm for visual stimulation in the EEG laboratory // Epilepsia. 2012. V. 53, № 1. P. 16–24.

15. *Федотчев А.И.* Анализ резонансных ЭЭГ-реакций при оценке эффективности сенсорных воздействий // Физиология человека. 1997. Т. 23, № 4. С. 117–123.

16. *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.

17. *de Graaf T.A., Gross J., Paterson G., Rusch T., Sack A.T., Thut G.* Alpha-band rhythms in visual task performance: phase-locking by rhythmic sensory stimulation // PLoS One. 2013. V. 8, № 3. Art. e60035. P. 1–12.

Новый метод использования нейроэмуляторов в психофизиологии

М.А. Филатов, Д.Ю. Филатова, А.И. Колосова, С.В. Григорьева, Д.В. Аскарова

Сургутский государственный университет

Введение

Исследование нейросетевых процессов, происходящих в структурах головного мозга, последние годы развивается параллельно с внедрением нейроэмуляторов в обработку и анализ получаемых данных в ходе психологических экспериментов. Искусственные нейросети могут не только помогать обрабатывать информацию о работе мозга в период когнитивной деятельности, но и получать некоторые модели сложных психических процессов. В ряду таких вспомогательных действий особое значение имеет принятие правильных решений о значимости (или незначимости) тех или иных параметров психических функций человека, находящегося в разных психических состояниях. Эти параметры могут сигнализировать об изменениях в психике, и тогда возникает задача о значимости различных диагностических признаков, описывающих те или иные психические состояния. Фактически, это задача о выборе параметров порядка, т. е. задача системного синтеза в психологии и нейробиологии, но роль динамической системы играет психика человека. При этом компоненты вектора состояния системы анализаторов могут быть представлены, например, по параметрам сенсомоторных реакций или когнитивных функций человека. В целом речь идет о системном синтезе в психологии и когнитивных науках. Следует отметить, что параметры анализаторов образуют некоторый вектор состояния системы $x = x(t) = (x_1, x_2, \ldots, x_m)^T$, который совершает непрерывное и хаотическое движение в m-мерном фазовом пространстве состояний – ФПС.

Восприятие внешних сигналов сенсорными системами и их обработка мозгом человека может быть проанализирована на простейших методиках регистрации x_i-параметров сенсомоторных реакций человека в ответ на представление зрительных или слуховых раздражителей. Однако при использовании сразу нескольких методик, при анализе сразу нескольких сенсорных каналов возникает задача идентификации наиболее существенных изменений в состоянии анализаторов при конкретных внешних воздействиях. Например, при широтных перемещениях может более значительно изменяться слуховой анализатор, чем зрительный, или наоборот и т. д.

В подобных случаях мы приходим к задаче идентификации параметров порядка (наиболее значимых диагностических признаков), которые могут выделить наиболее существенные изменения в состоянии того или иного вида анализаторов. Это задачи системного синтеза, которые мозг человека решает непрерывно и ежеминутно в любой когнитивной деятельности. В настоящем сообщении излагается новый подход в задаче системного синтеза при изучении состояния сенсорных систем с использованием нейроэмуляторов. При этом возможно создание внешней модели по отношению к психическим функциям человека как изучаемой системы и по отношению к ее изменениям под воздействием внешних (например, экологических) факторов среды обитания.

Объект и методы исследования

В качестве внешнего воздействия, которое изменяет состояние систем обработки информации зрительным или слуховым анализаторами, использовалось изменение экологических параметров окружающей среды путем перемещения большой группы детей младшего и среднего школьного возраста из северного региона России (ХМАО-Югра) в южный регион (берег Чёрного моря – Туапсе). Всего было перевезено 300 человек (в конце марта, то есть фактически для Югры это зимний период, когда температура воздуха была t = –11 °C, в весенний период, t = +20 °C). Результаты обработки сенсомоторных данных при использовании набора из 3 тестов представлены для 83 человек (девочки и мальчики). Производилось сравнение параметров сенсомоторных реакций отдельно для группы девочек и группы мальчиков (40 и 40 человек в каждой группе соответственно).

Обследуемым предъявлялись тесты для регистрации латентных периодов сенсомоторной реакции при предъявлении звукового сигнала (в таблицах ZVUK) и двух типов зрительного раздражителя. Латентные периоды этих трех психофизиологических тестов образовывали трехмерное фазовое пространство вектора состояния системы (ВСС) $x = x(t) = (x_1, x_2, x_3)^T$. При этом тест 1 направлен на исследование простой психомоторной реакции на включение красного квадрата в одном постоянном месте экрана (в таблицах KV_1 – x_1). Испытуемый должен был как можно быстрее после появления квадрата на мониторе компьютера нажать клавишу на клавиатуре. Выполнение задания оценивалось по среднему времени (каждому испытуемому было 10 представлений одного типа) реакции (латентный период), т. е. промежутку времени между появлением квадрата и нажатием «кнопки» (в секундах). В этом тесте мы изучаем состояние зрительного анализатора.

В другом тесте (3) было выполнено исследование простой психомоторной реакции (ZVUK – x_3) в виде реакции на звуковой раздражитель (краткий сигнал, с частотой 200 Гц, простой звуковой сигнал из компьютера). Здесь также испытуемый должен был как можно быстрее нажать на клавишу после появления звукового сигнала (10 повторов). Также оценивалось среднее время реакции (латентный

период), в секундах. Тест 2 отличался от первого только тем, что квадрат появлялся в произвольных областях экрана ($KV_2 – x_2$).

Были обследованы группы мальчиков и девочек в четырех основных состояниях: производилось сравнение состояний их психофизиологических функций до отъезда из Югры – (1), после их приезда в Туапсе – (2) (3 дня на адаптационный период), после лечения, но перед отъездом из Туапсе – (3) и по приезде (возвращению) в Сургут – (4). С помощью нейроэмулятора устанавливалось различие между группой мальчиков и девочек до отъезда на юг и после приезда в Туапсе. Использовалось трехмерное фазовое пространство вектора состояния психических функций $x(t)$, когда в нейрокомпьютер (НЭВМ) вводились обучающие выборки x_{ij}, где $i = 1, 2, 3$ – номер координаты фазового пространства, а $j = 1, 2, \ldots, n$, где n – число обследуемых в данной группе (мальчиков – 40 и девочек – 40). Обучающие выборки из n элементов для каждой i-й координаты фазового пространства вводились в НЭВМ k раз, где k – номер итерации – повтора решения задачи бинарной классификации нейроэмулятором для одинаковых (двух выборок).

Процедуры итераций ($k = 1, 2, \ldots, p$) производились при исходном хаотическом задании начальных весов w_{i0} признаков x_i, т. е. w_{i0} произвольно выбирались из интервала равномерного распределения (0, 1). Получаемые на выходе конечные веса признаков w_{ik} для каждой k-й итерации после решения задачи бинарной классификации образовывали группы (наборы) весов признаков, которые обрабатывались в рамках традиционной стохастики (определялись функции распределения $f(x)$). Эти же группы нами повторялись в наборах $p_1 = 50$, $p_2 = 100$, $p_3 = 1000$ при использовании НЭВМ в режиме итераций. Иными словами, мы изучали динамику поведения весов w_i признаков при малых числах итераций p и при увеличении числа итераций p (максимальное число итераций p доходило до 10^5).

Конечная цель наших исследований заключалась в выявлении возможностей гендерной идентификации наиболее значимых диагностических признаков из набора x_i.

Фактически, мы выявляли, какие сенсомоторные реакции наиболее значимо демонстрируют различия между параметрами психофизиологических функций девочек и мальчиков. Кроме этого, широтное перемещение и использование нейрокомпьютинга показывает возможные изменения значимости тех или иных психических функций в диагностике гендерных различий. Иными словами, мы отвечаем на вопрос: психика девочек и мальчиков по-разному реагирует на такие широтные перемещения или нет? Подобные задачи широко распространены в физиологии, психологии, экологии человека, когда система описывается многими признаками x_i и необходимо выявить среди них наиболее значимые в аспекте их изменений под действием внешних факторов (эксперимента).

Результаты исследований

Существенно, что все четыре пары сравнения (Сургут (1) – Туапсе (2) (прибытие); Туапсе (2) – Туапсе (3) (убытие); Туапсе (3) – Сургут (4) (возврат с юга) и Сургут (1) – Сургут (4)) не дают существенного статистического различия, однако задача бинарной классификации разрешается четко и можно идентифицировать веса w_i признаков x_i для каждой пары сравнения.

Использование нейроэмуляторов при решении задачи бинарной классификации в физиологии являлось до настоящего времени довольно продуктивным способом быстрой диагностики существенных (или несущественных) различий при оценке действия различных, в том числе и лечебных, факторов на исследуемый биологический объект.

Действительно, при действии неблагоприятных факторов среды на биосистемы нейроэмулятор однозначно может диагностировать различие между состоянием группы обследуемых до воздействия и после. Подобные задачи возникают не только в условиях действия медицинских или физических факторов, но и при широтных перемещениях (или климатических изменениях) групп испытуемых или в медицине при использовании различных методов лечения. В организме испытуемых при этом происходят изменения, что проявляется в физиологических параметрах [6, 7].

Однако вслед за выявлением существенных различий между двумя состояниями физиологической системы (в момент времени t_1 – до воздействия, и t_2 – после воздействия) возникает проблема выявления параметров порядка, т. е. наиболее важных диагностических признаков x_i ($i = 1, \ldots, k$, где $k < m$). В физиологии человека в качестве x_i могут выступать параметры функциональных систем организма (например, параметры сердечно-сосудистой системы – ССС или нервно-мышечной системы – НМС) или психофизиологических функций испытуемых [1], что мы демонстрируем сейчас.

Состояние организма испытуемых, их психофизиологических функций может характеризовать эффект экологического напряжения или экологического стресса. Поэтому попытки использования нейроэмуляторов для идентификации наиболее важных диагностических (физиологических) признаков представляет весьма важное направление в физиологии человека и медицине в целом [2–5].

Главная трудность при этом состоит в невозможности однозначного повторения любого состояния мозга, его нейронных систем. Действительно, если при каждой j-й итерации задавать начальные значения весов w_i признаков x_i из области равномерного распределения на отрезке (0, 1), то после настройки нейросети мы будем получать уникальные и неповторимые значения весов признаков x_i, которые на графике можно представить в виде ординат, а по горизонтальной оси откладывать j-й номер итерации ($j = 1, 2, \ldots, p$). Наборы этих ординат для всех $p = 50$ итераций

(а также $p = 100$ и $p = 1000$) образуют выборку по каждой координате x_i всего вектора состояния (это выборка весов признаков x_i).

В таблице 1 для $p = 50$ мы получаем пять разных законов распределений (и они все разные!), а для N серий по p итераций в каждой мы получим $N \cdot m$ выборок и функций распределения. Однако для каждой p-й серии будем иметь уникальное распределение весов признаков. Такая ситуация является обычной (или нормальной) для хаотического процесса настройки нейросети при одинаковых обучающих выборках (и наборах x_{i0}).

Именно такой хаотической настройкой нейросети мы сейчас объясняем хаос тремора, кардиоинтервалов и любых других параметров гомеостаза отдельного организма и любой физиологической системы в целом [8–10]. В этом случае реальная нейросеть мозга (как и НЭВМ) работает в режиме самоорганизующегося хаоса, когда нет повторов статистических функций распределения $f(x)$.

Таблица 1

Усредненные значения отдельных координат x_i весов признаков w_i вектора состояния системы $x(t)$ (параметры w_i – это веса показателей x_i сенсомоторных реакций детей перед отъездом из Сургута) при идентификации параметров порядка нейроэмулятором после $p \geq 50$ итераций (настроек ЭВМ) в режиме бинарной классификации (разделение группы девочек и мальчиков) перед отъездом из Сургута

Нейросети с $p \leq 200 = 4 \cdot 50$			
Расчеты итераций по выборкам ($p \geq 50$)	Средние значения весов признаков $<w_i>$ для координат вектора состояния системы x_i по наибольшим и наименьшим весам		
Координаты x_i	$KV_2 = <w_2>$, x_2	$KV_1 = <w_1>$, x_1	$ZVUK = <w_3>$, x_3
$p = 200$ $j = (1, \ldots, 200)$	0,800	0,680	0,330
$p = 50$ $j = (1, \ldots, 50)$	0,793	0,692	0,325
$p = 50$ $j = (50, \ldots, 100)$	0,808	0,673	0,335
$p = 50$ $j = (100, \ldots, 150)$	0,794	0,692	0,341
$p = 50$ $j = (150, \ldots, 200)$	0,806	0,664	0,319
Интервалы изменений $<\Delta w_i>$	0,015	0,028	0,016

Таким образом, мы утверждаем: для каждой такой процедуры на выходе каждый раз мы получаем один и тот же общий результат в виде дифференцировки 2 выборок (искусственные нейронные сети, как и биологические, реализуют задачу бинарной классификации), но в каждый момент времени величины весов признаков w_{ij}, т. е. внутренней структуры нейронной сети, будут различными. Это значит, что все уже известные, т. е. полученные ранее, в физиологии и медицине параметры исследований, связанные с численными расчетами на основе нейроэмуляторов, могут иметь значимый вклад в постановку диагноза о состоянии биосистемы, а могут быть и недостоверными. Эти меры значимости определяются также нашей искусственной нейронной сетью (НЭВМ) путем подсчета весовых коэффициентов w_{ij} в режиме p итераций настройки НЭВМ. При этом сами значения x_i тоже могут хаотически изменяться, и поэтому мы должны проверять еще и наличие различий в исходных выборках x_i.

Нижняя строка в таблице 1 показывает интервал изменения всех трех усредненных весов по пяти сериям ($N = 5$) повторов настройки нейросети в каждой таблице. Очевидно, что вариационный размах для разных выборок по 5 в каждой таблице неуклонно уменьшается. При переходе от $p = 100$ к $p = 1000$ резко (на порядок) уменьшается вариационный размах w_i. Например, для $<\Delta w_i>$ мы имеем при $p = 50$: $<\Delta w_1> = 0{,}028$; $<\Delta w_2> = 0{,}015$; $<\Delta w_3> = 0{,}016$, а при $p = 1000$: $<\Delta w_1> = 0{,}0163$; $<\Delta w_2> = 0{,}0132$; $<\Delta w_3> = 0{,}0039$, т. е. по x_3, например, вариационный размах уменьшится в 4,1 раза. Такое резкое снижение отклонений в величинах средних весов показывает сходимость весов признаков при $p \to \infty$ и нарастании N.

После широтного перемещения – переезда в Туапсе для $p = 1000$ мы получили в таблице 2 реальное изменение параметров порядка. На первое место вышел признак $KV_1 – x_1$. Но на второе место вышел $x_3 – ZVUK$ ($w_3 = 0{,}5512$ против третьего места до отъезда), а x_2 занял последнее место по значимости.

Таким образом, при переезде и переходе к $p \geq 1000$ картина изменяется. Возникновение нормального закона распределения крайне маловероятно, а непараметрические законы распределения приближаются к одной генеральной совокупности. Более того, относительный разброс (относительные колебания весов признаков) на каждой выборке при больших p резко убывает.

Таблица 2

Усредненные значения отдельных координат x_i весов признаков w_i вектора состояния системы $x(t)$ (параметры w_i – это показатели весов x_i сенсомоторных реакций детей после приезда в санаторий) при идентификации параметров порядка нейроэмулятором после $p \geq 1000$ итераций (настроек ЭВМ) в режиме бинарной классификации (разделение группы девочек и мальчиков) после приезда в Туапсе

Нейросети с $p \leq 400 = 4 \cdot 100$			
Расчеты итераций по выборкам ($p \geq 1000$)	Средние значения весов признаков $<w_i>$ для координат вектора состояния системы x_i по наибольшим и наименьшим весам		
Координаты x_i	$KV_1 = <w_1>$, x_1	$ZVUK = <w_3>$, x_3	$KV_2 = <w_2>$, x_2
$p = 4000$ $j = (1, \ldots, 400)$	0,7837	0,5512	0,5140
$p = 1000$ $j = (0, \ldots, 1000)$	0,7847	0,5520	0,5088
$p = 1000$ $j = (1000, \ldots, 2000)$	0,7811	0,5452	0,5054
$p = 1000$ $j = (2000, \ldots, 3000)$	0,7876	0,5604	0,5217
$p = 1000$ $j = (3000, \ldots, 4000)$	0,7814	0,5471	0,5201
Интервалы изменений $<\Delta w_i>$	0,0065	0,0152	0,0163

Многочисленные повторы показали отсутствие больших флуктуаций, т. е. наблюдаем сходимость каждого признака к своему среднему значению. При переходе к числу итераций в миллион ($p = 10^6$) мы получаем устойчивое значение весов признаков по каждому $i = 1, \ldots, m$ (у нас $m = 3$). Вариации значимости весов при миллионе итераций наблюдаются в 5-м и 6-м знаке после запятой, тогда как для $p = 1000$ мы можем получить отклонения во 2-м или 3-м знаке после запятой.

Такая закономерность определяет оптимальное число итераций при использовании нейроэмулятора в качестве модели выбора параметров порядка при изучении биосистем. Выявление существенной или несущественной значимости признаков x_i при сравнении двух состояний экосистем (до воздействия или после) целесообразно выполнять при числе итераций нейроэмулятора с хаотическим набором исходных весов признаков на интервале (0, 1) не менее $p = 1000$.

Выводы:

1. При анализе компонент вектора x_i состояния психофизиологической системы, если процедура идентификации производится однократно, нейроэмуляторы нецелесообразно использовать, так как результат будет искаженный, параметры порядка нельзя идентифицировать.

2. Точность идентификации параметров порядка для x_i на базе нейросетевых технологий возрастает с ростом числа итераций p (реально мы имеем только две значащие цифры при $p > 1000$ итераций).

3. Физиологические системы изменяются непрерывно [12], но они повторяют свои состояния в многообразии и тем самым задают правильные векторы своего развития (эволюции). Нейроэмулятор может задать любую точность идентификации параметров порядка, если при совпадении k значащих цифр после запятой перейти от k итераций к $k + 1$ числу итераций. На $k + 1$ порядке значащих цифр появятся различия в совпадающих k цифрах (до этого).

Литература

1. *Анохин П.К.* Кибернетика функциональных систем. М. : Медицина, 1998. 285 с.

2. *Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е., Хадарцев А.А.* Особые свойства биосистем и их моделирование // Вестник новых медицинских технологий. 2011. Т. 18, № 3. С. 331–332.

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

4. *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.

5. *Eskov V.M., Eskov V.V., Filatova O.E.* Characteristic features of measurements and modeling for biosystems in phase spaces of states // Measurement Techniques (Medical and Biological Measurements). 2011. V. 53 (12). P. 1404–1410.

6. *Eskov V.M., Gavrilenko T.V., Kozlova V.V., Filatov M.A.* Measurement of the dynamic parameters of microchaos in the behavior of living biosystems // Measurement Techniques. 2012. V. 55, № 9. P. 1096–1100.

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

8. Foerster's H. Basic Concepts of Homeostasis // Homeostatic Mechanisms. New York : Upton, 1958. P. 216–242.

9. *Foerster's H.* What is Memory that It May Have Hindsight and Foresight as well? // The Future of the Brain Sciences : Proceedings of a Conference held at the New York Academy of Medicine, pp. Bogoch (Hg.). New York : Plenum Press, 1969. P. 19–64.

10. *Foerster's H.* Technology: What Will It Mean to Librarians? // Illinois Libraries. 1971. V. 53, № 9. P. 785–803.

11. *Haken H.* Principles of brain functioning: a synergetic approach to brain activity, behavior and cognition. Springer, 1995. 349 p. (Springer Series in Synergetics).

12. *Mayr E.W.* What evolution is. New York : Basic Books, 2001. 349 p.

13. *Prigogine I.* The Die Is Not Cast // Futures. Bulletin of the Word Futures Studies Federation. 2000. V. 25, № 4. P. 17–19.

Пластические сети – нейродинамическая основа когнитивных функций мозга

В.Д. Цукерман

Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Ростов-на-Дону
vtsukerman17@yandex.ru

Фундаментальной для когнитивной деятельности мозга является его способность формировать и сохранять в активном состоянии информацию в рабочей памяти. Рабочая память является результатом многочисленных нейродинамических механизмов высокоуровневого сенсорного кодирования, сжатия, пластических нейросетевых перестроек, вызова и поддержания информации при вызове из долговременной памяти. Наши модельные исследования выполнялись с целью определить биофизические основополагающие нейродинамические характеристики кодирования памяти в условиях известных феноменов синаптической изменчивости, баланса возбуждения и торможения в кортикальных нейронных микросхемах, гомеостаза и двух форм – быстрой и медленной гомеостатической пластичности с учетом кратко приведенных ниже современных нейробиологических данных.

Мозг удивительно пластичен. Известно, что базовый элемент межнейронных связей мозга – отдельные синапсы – постоянно изменяет свой размер и силу и *in vitro*, и *in vivo* [1]. Даже без экспериментального вмешательства зрелый мозг постоянно «перешивает» себя [2]. Такая синаптическая перестройка следует из бесконечного оборота дендритных спинов – локальных выпячиваний дендритов большинства кортикальных нейронов. В зависимости от исследованных типов клеток и отделов мозга дендриты получают и теряют спины со скоростью от приблизительно 1 % в день в первичной зрительной коре [3] до примерно 5 % в день в области CA1 гиппокампа [4] и около 15 % в день в первичной соматосенсорной коре мозга [5]. Это выглядит парадоксально. Действительно, как при такой высокой синаптической изменчивости мозг в состоянии поддерживать обе формы памяти, стабильные вычислительные возможности, представления внешних и внутренних признаков организма и эффективное выполнение когнитивных функций? Существует мнение, что такая стабильность в динамических биологических системах, подобных мозгу, может являться результатом нестабильных составляющих [6]. Например, долговременные стабильные представления стимульных признаков экспериментально наблюдаются (при депривации одного глаза) на уровне высокопорядковых нейронных популяций [7]. При этом, однако, остается неясным, происходит ли стабильное популяционное кодирование из инвариантных стимульных селективностей отдельных нейронов или из шумящих и потенциально дрейфующих одноклеточных ответов, которые «составлены в среднем» по большому количеству нейронов, вызывающих общее устойчивое схемное решение текущих задач организма [8].

Баланс возбуждения и торможения – фундаментальное свойство кортикальных сетей мозга – важен для контроля генерации спайков, обработки информации, синаптической пластичности и предотвращения эпилепсии. Общепринятый принцип баланса возбуждения и торможения «E–I» важен потому, что управление одной проводимостью без другой может сместить кортикальную активность к нефизиологическим экстремальным значениям. Отсюда не следует, однако, что возбуждающие и тормозные проводимости, являются равными, т. е. аннулируют друг друга. Принцип баланса может привести к неправильному представлению, что основная роль кортикального торможения состоит в том, чтобы предотвратить эпилептиформную активность, что является слишком упрощенным представлением. Важно, что, несмотря на общую пропорциональность возбуждения и торможения, их точное отношение высоко динамично [9]. Так, во время нового обучения, процесса, в котором информация сохраняется модификацией силы возбуждающих синапсов, это равновесие нарушается [10]. Современные экспериментальные работы на грызунах и теоретические модели предполагают, что пластичность тормозных синапсов играет центральную роль в восстановлении баланса E–I, позволяя тормозным связям зеркально точно отражать их возбуждающие входы [11, 12]. Баланс E–I зависит от идентичности и пресинаптического, и постсинаптического типа клеток, и предполагается, что возбуждающие типы клеток могут дифференцированно рекрутировать специфические субсети тормозных интернейронов различными возбуждающими типами клеток [13]. И действительно, недавно появилось сообщение об интернейронной кооперативности, формирующей специфические группы молекулярно сходных интернейронов экспрессирующих *vasoactive intestinal peptide* (VIP), *somatostatin* (SOM) и *parvalbumin* (PV), и о реципрокном торможении между этими специфическими группами [14].

Нейромодуляция и хеббовская пластичность взаимодействуют в формировании ассоциативной памяти. Хеббовская пластичность традиционно рассматривалась как механизм, которым информация может быть закодирована и сохранена в нейронах мозга. Эта теория предполагала, что память формируется посредством усиления синаптических связей между нейронами с коррелированной активностью. Однако недавно получено прямое экспериментальное *in vivo* доказательство, что для формирования новой памяти совместно

с механизмами хеббовской пластичности должны активироваться и нейромодуляторные системы [15]. Это исследование подтверждает необходимость параллельного механизма вовлечения нейромодуляции и хеббовских процессов, что является необходимым и достаточным для вызова синаптического усиления и поведенческого ассоциативного формирования памяти, и этот параллельный процесс представляет собой общий механизм, используемый многими обучающими системами мозга [15].

Две формы пластичности нейронных сетей лежат в основе памяти. Хеббовская пластичность играет важную роль в таких фундаментальных свойствах мозга, как обучение, память, развитие и восстановление после потери функции. Гомеостатическая пластичность смещает нейрон обратно к своему исходному состоянию после возмущения, включая возмущения, произведенные хеббовской пластичностью. Гомеостатическая пластичность в широком смысле может быть определена как нейронное изменение, которое имеет тенденцию возвращать нейрон назад к начальной уставке; это может достигаться многими механизмами, включая синаптическое масштабирование, изменения в торможении и изменения во внутренних мембранных свойствах. Важность гомеостатической пластичности состоит в том, что она препятствует насыщению на обоих концах рабочего диапазона частот нейронов, поскольку может предотвратить насыщение синаптической силы, которое на краях диапазона уменьшает кодирующую способность нейрона, если предполагать, что механизмы гомеостатической и хеббовской пластичности работают вместе [16]. Средние частоты активности значительно различаются среди пирамидных нейронов, но удивительно стабильны во времени для отдельного нейрона. Существуют, конечно, флуктуации в частоте активности, ведомые внешним зрительным входом или внутренними факторами, но эти флуктуации возникают в окрестности среднего уровня, который является характеристическим для данной клетки и сохраняется многие дни. Эта стабилизация средней частоты активности предполагает, что любые вызванные опытом изменения в синаптической силе, которые накапливаются со временем в процессе нормального развития, могут быть полностью компенсированы гомеостатическими механизмами [16]. Таким образом, две формы пластичности часто работают в противоположных направлениях. Хеббовская пластичность с необходимостью приводит к процессу положительной обратной связи, так как активность возрастает, когда увеличение синаптической передачи увеличивает вероятность дальнейшего увеличения синаптической передачи. Гомеостатическая пластичность, с другой стороны, включает отрицательную обратную связь, которая возвращает нейрон к его исходному состоянию после возмущения, включая колебания, произведенные хеббовской пластичностью. Этот механизм комбинированного взаимодействия активности положительной и отрицательной обратной связи имеет различные постоянные времени срабатывания, что использовалось нами в вычислительных экспериментах. Добавим также, что механизм комбинированного взаимодействия не единственный, который позволяет восстанавливать исходное состояние нейронов после возмущения.

Для восстановления параметров нейродинамической настройки клеток после возмущения в дополнение к двум формам пластичности существует еще один важный фактор – организация кортикальных микросхем. В частности, две характерные особенности этих микросхем включают: наличие субсети непластических связей и высокорекуррентной сети пластических соединений между сходно настроенными клетками. Эти особенности имеют тенденцию увеличивать устойчивость системы в покое, несмотря на постоянную реорганизацию в синаптических соединениях, что возвращает нейроны обратно к сбалансированной установочной точке пластических сетей мозга [17]. Необходимо отметить также ранее сделанное экспериментальное наблюдение, что паттерны связанности в локальных кортикальных микросхемах мозга носят неслучайный характер; т. е. большинство связей являются слабыми, а редкие сильные связи имеют высокую вероятность быть двунаправленными [18]. Это обстоятельство, как будет показано далее в наших модельных исследованиях, получило теоретическое развитие в задачах пространственной рабочей памяти.

В заключение обзора подчеркнем, что, изучая пластичность мозга, можно заметить две противоположные тенденции. Одна из них говорит о том, что наше постоянно меняющееся сенсорное окружение требует гибкого адаптивного поведенческого реагирования на него. Вместе с тем, как отмечено выше, нейросетевая пластичность должна быть сбалансирована механизмами, гарантирующими постоянство нейронных представлений для достижения стабильного поведения. Тем не менее заметные изменения в синаптической силе и связанности происходят также во время нормального сенсорного опыта, указывая на определенную степень *врожденной пластичности мозга* [17]. Каковы нейродинамические корреляты стабильных нейронных представлений на популяционном уровне, а также на уровне одиночных нейронов?

Современные данные продолжительных электрофизиологических и оптических регистраций одноклеточной активности (в течение многих месяцев) [17], которые оценивают долговременную стабильность нейронной стимульной селективности в условиях постоянного процесса восприятия во время обучения и после обратимой модификации сенсорного входа, говорят о том, что нейронные представления стабилизируются поведенческой релевантностью, а степень долговременной стабильности и сопротивление возмущениям непосредственно следуют из функциональной роли соответствующих типов нейронов и организации связей в нейронных микросхемах. В частности, стабильные базовые представления и точное восстановление после возмущений в зрительной коре

мозга предполагают, что они могли возникать из «магистрали» сильной рекуррентной связанности между сходно настроенными клетками вместе с небольшим количеством «якорных», жестко связанных нейронов, освобожденных от пластических изменений [17]. Подводя итог в целом, отметим, что рассмотренные выше нейробиологические данные составляют основу исходных данных, принятых нами при моделировании нейродинамических процессов рабочей памяти.

Модельные исследования рассмотренных выше нейродинамических феноменов рабочей памяти выполнялись с использованием свободно масштабируемых нейронных сетей с четным циклическим торможением (*ECI-networks*) ранее исследованных нами на примере решения навигационных задач пространственной эпизодической памяти. Подробное описание способа фазового кодирования событийных последовательностей в *ECI-networks*, векторного способа интегрирования траектории пространственного движения и методику вычислительных экспериментов можно найти в наших работах [19–21]. Результаты наших последних вычислительных экспериментов представлены во втором докладе на данной конференции. Одной из основных задач этих экспериментов являлась проверка идеи о растормаживании в тормозных интернейронных сетях мозга при кодировании эпизодов рабочей памяти. Такая процедура в модельных экспериментах с *ECI-networks* сопровождалась отключением определенных тормозных нейронов, малых групп и целых ансамблей сети, что позволило показать участие в модуляции траектории пространственного движения остающихся нейронов сети. Эта идея получила свое полное подтверждение, значительно дополнив арсенал инструментов фазового кодирования эпизодической рабочей памяти, включающий временные и амплитудные характеристики событийных последовательностей.

Литература

1. *Loewenstein Y., Kuras A., Rumpel S.* Multiplicative dynamics underlie the emergence of the log-normal distribution of spine sizes in the neocortex *in vivo* // J. Neurosci. 2011. V. 31. P. 9481–9488.

2. *Holtmaat A., Svoboda K.* Experience-dependent structural synaptic plasticity in the mammalian brain // Nat. Rev. Neurosci. 2009. V. 10. P. 647–658.

3. *Hofer S.B., Mrsic-Flogel T.D., Bonhoeffer T., Huebener M.* Experience leaves a lasting structural trace in cortical circuits // Nature. 2009. V. 457. P. 313–317.

4. *Attardo A., Fitzgerald J.E., Schnitzer M.J.* Impermanence of dendritic spines in live adult CA1 hippocampus // Nature. 2015. V. 523. P. 592–596.

5. *Holtmaat A., Trachtenberg J.T., Wilbrecht L., Shepherd G.M., Zhang X., Knott G.W., Svoboda K.* Transient and persistent dendritic spines in the neocortex in vivo // Neuron. 2005. V. 45. P. 279–291.

6. *Chaudhuri R., Fiete I.* Computational principles of memory // Nat. Neurosci. 2016. V. 19. P. 394–403.

7. *Rose T., Jaepel J., Huebener M., Bonhoeffer T.* Cell-specific restoration of stimulus preference after monocular deprivation in the visual cortex // Science. 2016. V. 352. P. 1319–1322.

8. *Lutcke H., Margolis D.J., Helmchen F.* Steady or changing? Long-term monitoring of neuronal population activity // Trends Neurosci. 2013. V. 36. P. 375–384.

9. *Isaacson J.S., Scanziani M.* How inhibition shapes cortical activity // Neuron. 2011. V. 72. P. 231–243.

10. *Nabavi S., Fox R., Proulx C.D., Lin J.Y., Tsien R.Y., Malinow R.* Engineering a memory with LTD and LTP // Nature. 2014. V. 511. P. 348–352.

11. *Vogels T.P., Sprekeler H., Zenke F., Clopath C., Gerstner W.* Inhibitory plasticity balances excitation and inhibition in sensory pathways and memory networks // Science. 2011. V. 334. P. 1569–1573.

12. *D'amour J.A., Froemke R.C.* Inhibitory and excitatory spike-timing-dependent plasticity in the auditory cortex // Neuron. 2015. V. 86. P. 514–528.

13. *Naka A.* Cell-type-specific manipulation reveals new specificity in the neocortical microcircuit // J. Neurosci. 2015. V. 35. P. 8976–8978.

14. *Karnani M.M., Jackson J., Ayzenshtat I., Tucciarone J., Manoocheri K., Snider W.G., Yuste R.* Cooperative subnetworks of molecularly similar interneurons in mouse neocortex // Neuron. 2016. V. 90. P. 86–100.

15. *Johansen J.P., Diaz-Mataix L., Hamanaka H., Ozawa T., Ycu E., Koivuma J., Kumar A., Hou M., Deisseroth K., Boyden E.S., LeDoux J.E.* Hebbian and neuromodulatory mechanisms interact to trigger associative memory formation // PNAS USA. 2014. P. E5584–E5592.

16. *Turrigiano G.G.* The dialectics of Hebb and homeostasis // Phil. Trans. R. Soc. B. 2017. V. 372, iss. 1715.

17. *Clopath C., Bonhoeffer T., Huebener M., Rose T.* Variance and invariance of neuronal long-term representations // Phil. Trans. R. Soc. B. 2017. V. 372. Art. 20160161.

18. *Song S., Sjöström P.J., Reigl M., Nelson S., Chklovskii D.B.* Highly nonrandom features of synaptic connectivity in local cortical circuits // PLoS Biol. 2005. V. 3. Art. e. 350.

19. *Цукерман В.Д., Еременко З.С., Каримова О.В., Сазыкин А.А., Кулаков С.В.* Математическая модель пространственного кодирования в гиппокампальной формации. I. Нейродинамика решетчатых клеток // Математическая биология и биоинформатика. Пущино : ИМПБ РАН, 2012. Т. 7, вып. 1. С. 87–124.

20. *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. Пущино : ИМПБ РАН, 2014. Т. 9, вып. 1. С. 216–256.

21. *Tsukerman V.D., Kulakov S.V.* A temporal ratio model of the episodic memory organization in the ECI-networks // Contemp. Engin. Sciences. 2015. V. 8. P. 865–876.

Математическая модель пространственной ориентации на основе нейродинамического баланса возбуждения и торможения в нейронной сети

В.Д. Цукерман, Н.А. Еритенко

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону
vtsukerman17@yandex.ru

Активность клеток энторинально-гиппокампальной системы мозга, участвующих в навигационном поведении, представлена нерегулярно локализованными паттернами гиппокампальных клеток места (*place cells*) и пространственными гексагональными «решеткоподобными» паттернами в медиальной энторинальной коре. Современными исследованиями показано, что указанные клетки составляют основу системы эпизодической памяти, контекстом которой являются пространство и время, в которых протекает индивидуальная жизнь всех организмов. По данным американских ученых, начальная стадия болезни Альцгеймера выражается именно в трудностях при ориентации в пространстве. По их данным, способность ориентироваться в пространстве зависит от участков мозга, ответственных за эпизодическую память, и именно эти участки мозга страдают в первую очередь при болезни Альцгеймера. Известно также, что за расстройства спектра аутизма в период развития у детей также ответственны нарушения в работе вышеуказанных структур мозга. Таким образом, изучение принципов функционирования и нейрональных основ системы пространственной ориентации и навигационного поведения у высших организмов представляется фундаментальной проблемой современной когнитивной нейронауки.

Данная работа построена на проведении исследований модели нейронных сетей с четным циклическим торможением (*ECI-networks*) [1–3] в решении частной задачи пространственной ориентации, а именно определить возможность реализации векторного способа управления пространственной ориентацией и основные параметры, определяющие нейродинамические коды эпизодов пространственного поведения.

Методом настоящего исследования является манипуляция специфическими признаками нейронной популяционной активности, которые принимают участие в фазовом кодировании эпизодов пространственного поведения, и изучение, как эти манипуляции влияют на решения системы пространственной ориентации. В вычислительных экспериментах исследовались: а) влияния межсобытийных одноименных и разноименных временные интервалов CW- и CCW-паттернов сигналов частных пространственных эпизодов; б) амплитуды паттернов событийных сигналов обоих типов; в) роль отдельных участников – информационных единиц, их групп и целых ансамблей в модификации пространственных ориентаций агента.

Детальное описание математической модели, способа фазового кодирования событийных последовательностей в *ECI-networks*, векторного способа интегрирования траектории пространственного движения и методику вычислительных экспериментов можно найти в наших работах [2, 3]. Схема пространственной организации многослойных сетей с четным циклическим торможением приведена на рис. 1.

Важными элементами организации схемы *ECI-networks* является их связь со схемой тела навигатора и наличие двух дирекционально-чувствительных кластеров клеток. В силу симметричности организации сети все информационные единицы (воспринимающие внешние сигналы) могут быть разделены на две группы: одна из них имеет чувствительность к поворотам по часовой стрелке (CW) относительно вертикальной оси к плоскости поворота, а другая – против часовой стрелки (CCW) относительно той же оси.

Паттерны входных сигналов, поступающие на информационные единицы *ECI*-сети, представляют собой временные последовательности импульсов с определенным шагом градиента амплитуды и постоянной длительностью. Каждый отдельно взятый паттерн подается на входы клеток, топологически отнесенные к CW- или CCW-чувствительным кластерам клеток сети, что соответствует разделению тормозных интернейронов на популяции молекулярно сходных интернейронов, активных в различные времена возбуждающего афферентного драйва этих схем, обнаруженных экспериментально в последнее время [4].

Все входные сигналы в данной модели делятся на две категории: специфические и неспецифические. Специфические сигналы поступают на определенные, в частности CW- или CCW-информационные, единицы. Неспецифические воздействия (нейромодуляторные) сообщаются всем информационным единицам сети. На референтные (некодирующие) единицы сети поступают постоянные сигналы смещения, обеспечивающие генерацию референтного тета-ритма и в то же время устойчивость нейродинамики сети.

В данной работе рассматриваются два механизма балансирования. Первый механизм определяет баланс между одноименными событийными сигналами (например, между CW), возникающими при их «зеркальном» отражении в следующем, т. е. через период генерации тета-ритма в сети. Такое отражение соответствует паттернам сигналов с противоположными градиентами амплитуд.

Данный баланс одноименных паттернов сигналов приводит к прямолинейному локальному сегменту траектории в правой (нижней) полуплоскости эгоцентрической системы координат, связанной с навигатором. Второй механизм балансирования определяет баланс разноименных последовательностей CW- и CCW-сигналов и отражается в отклонении вектора пространственной ориентации навигатора от эгоцентрического фронтального направления движения.

Отметим, что в контексте схемной нейросетевой организации баланс в обоих случаях был основан на возбуждающе-тормозном взаимодействии между паттернами входных возбуждающих сигналов и тормозными межнейронными взаимодействиями, компенсирующими полностью или частично суммарную активность нейронов сети, обладающих специфической чувствительностью к тем или иным пространственным поворотам векторов пространственной ориентации. В том случае, когда достигалось новое равновесное положение вектора пространственной ориентации, это интерпретировалось, как изменение уставки гомеостатической регуляции фронтального направления движения навигатора. Отметим также, что в ансамбль *ECI*-сети входят нейроны с преимущественной чувствительностью к обоим типам поворотов относительно вертикальной оси тела и топологически представленные в сети замкнутыми контурами (кольцами, рис. 1).

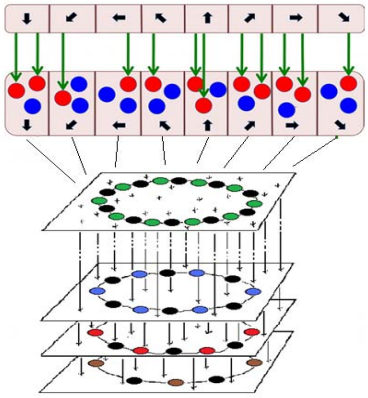
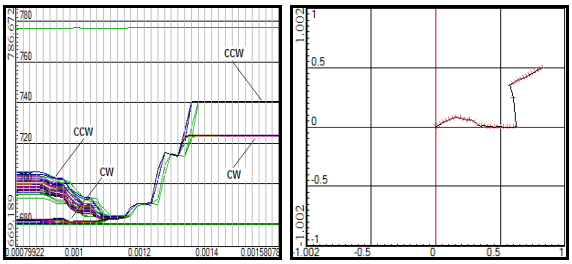


Рис. 1. Схема пространственной организации многослойных сетей с четным циклическим торможением (нижняя часть рисунка) и организация возбуждающих сенсорных сигналов различной ориентационной чувствительности лево- и правосторонних поворотов на входах сети (верхняя часть рисунка)

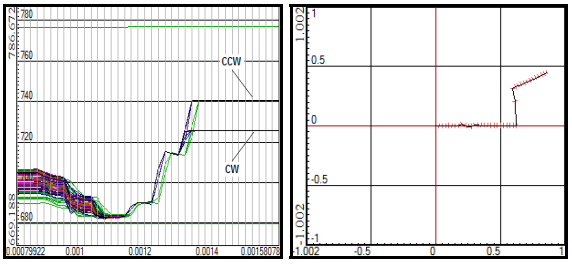
Здесь мы покажем многозначность фазовых и пространственных представлений, которые зависят от различных временных интервалов во входных последовательностях сигналов. Для определенности рассмотрим эпизоды, представленные последовательностями CCW→CW-сигналов. Такой выбор порядка поступления сигналов вполне произволен в силу симметрии структурной организации нейронных сетей. На рис. 2, *а–в* показано влияние временного интервала между градиентными входными сигналами противоположной направленности на ансамбли CCW- и CW-клеток. Приведенные серии вычислительных экспериментов свидетельствуют о закономерностях нейросетевой динамики. Во-первых, в силу независимости представлений кривые фазовых ответов двух популяций клеток с противоположными пространственными предпочтениями (CW и CCW) могут занимать различные относительные положения в референтном тета-цикле. Первая последовательность CCW-сигналов в эпизоде занимает определенное временное окно в референтном тета-цикле

а



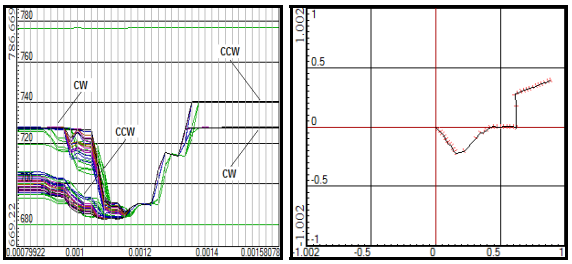
Эпизод 5k-2017-60.61-94.92.78

б



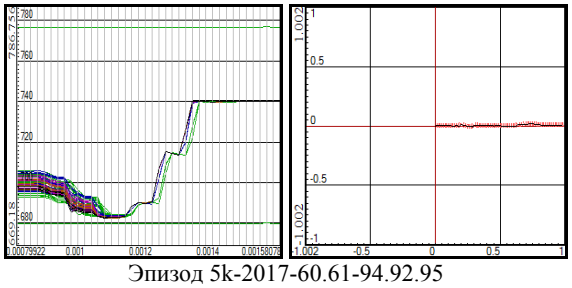
Эпизод 5k-2017-60.61-94.94.78

в



Эпизод 5k-2017-60.61-94.96.78

г



Эпизод 5k-2017-60.61-94.92.95

Рис. 2. Фазовые и пространственные представления навигационных эпизодов зависят от временного интервала между событиями противоположной, а также одноименной направленности. Сверху вниз этот интервал составляет последовательно: 92, 94 и 96 усл. ед. времени. Баланс между ансамблями с противоположными дирекциональными предпочтениями определяется некоторым оптимальным значением временного интервала между ними (в данном случае 94 у. е., близкий к периоду тета-ритма), при котором наблюдается сильное перекрытие фазовых треков ансамблей нейронов обеих направленностей (рис. *б*, слева). На рис. *в* последний временной интервал (95 у. е.) между одноименными CW-событиями может спрямлять всю траекторию движения.

(обозначено зелеными горизонтальными линиями) и дальнейшее фазовое кодирование CW-сигналов определяется временным интервалом между обеими дирекциональными последовательностями сигналов. В частности, при определенных значениях временного интервала между ними фазовые представления обоих типов ансамблей могут перекрываться, т. е. показывать сильную фазовую синхронизацию (временное сжатие) и соответственно выпрямлять начальный участок пространственной траектории (показано на рис. 2, *б*, справа).

Отклонение от равновесной величины временного интервала в ту или иную сторону приводит к относительному фазовому смещению ансамблей CW-чувствительных клеток (рис. 2, *а*, *в*, слева) и соответственно изменению направлений начального участка пространственной траектории (рис. 2, *а*, *в*, справа).

Наряду с временными межсобытийными интервалами характер фазовых траекторий и пространственных представлений эпизода зависит также от амплитуд градиентных сигналов обоих направленностей (в докладе будет представлено).

Одной из важных задач, связанных с выученным навигационным поведением при движении вдоль хорошо известного маршрута, является его локальное изменение при неожиданно возникших обстоятельствах, например появлении различного рода препятствий (забор, траншея, изменение входа в здание и т. д.). Как при таком локальном изменении привычного маршрута может происходить модификация соответствующей сетевой траектории в схемной организации нейронов? Эту задачу мы решали на примере *ECI-networks*, основываясь на известном механизме растормаживания в тормозных интернейронных сетях мозга [5–7]. В наших вычислительных экспериментах этот механизм был реализован посредством выключения отдельных тормозных интернейронов, их групп и целых ансамблей в схеме *ECI-network* в процессе кодирования событийных последовательностей при формировании рабочей памяти частного пространственного эпизода.

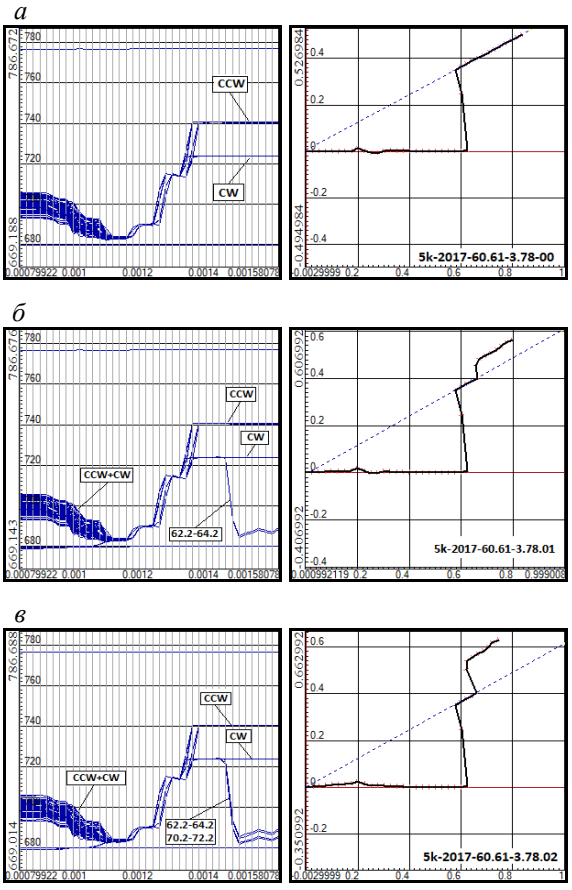


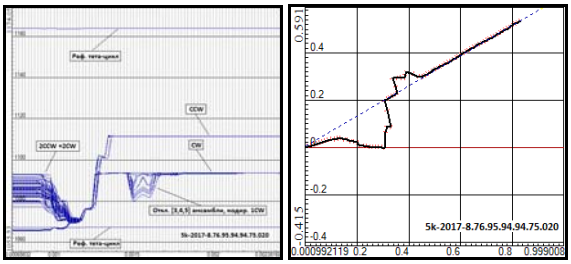
Рис. 3. Фазовые и пространственные представления навигационных эпизодов с отключением различных малых групп нейронов: *а* – исходная последовательность эпизода; *б* и *в* – модуляция траекторий отключением малых групп тормозных нейронов сети, показанных на соответствующих графиках. Пунктирная линия – исходное целевое направление

Как видно на рис. 3, этот механизм наряду с временными межсобытийными интервалами и амплитудами специфических событий является еще одним инструментом кодирования и формирования эпизодической рабочей памяти. Локальная модуляция простой исходной траектории, представленной одним левым и одним правым поворотом, осуществляется выключением малых групп тормозных нейронов сети, причем амплитуда смещений от исходного целевого направления (рис. 3, *а*) определяется количеством специфических участников данного процесса. Выключение большего числа тормозных нейронов (процедура растормаживания) приводит к большему смещению пространственной траектории (ср. рис. 3, *б*, *в*).

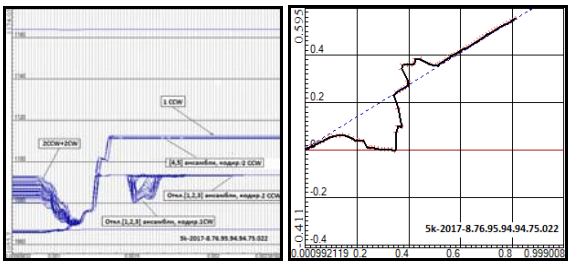
Далее представлены эпизоды с большим числом событийных CCW- и CW-последовательностей паттернов сигналов, о чем свидетельствуют более сложные траектории, показанные на рис. 4 справа. С одной стороны, пример двух достаточно похожих пространственных эпизодов свидетельствует о возможности их реализации различными нейросетевыми схемами, в которые рекрутировано различное число нейронов, и, следовательно, об определенной избыточности кодов рабочей памяти. И это имеет свое подтверждение в нашем повседневном опыте, когда, например, отправляясь на работу одним и тем же маршрутом, мы не идем всякий раз точно след в след. С другой стороны, этот пример демонстрирует возможность не только смещений целевого направления, как в предыдущих примерах, показанных на рис. 3, но и возврата на целевое направление после обхода препятствий.

Представленная вычислительная модель есть комбинированное векторное решение задачи пространственной ориентации агента с участием многочисленных нейросетевых механизмов и перечисленных выше инструментов. Наиболее важным отличием представленной работы является полученное в вычислительных экспериментах доказательство, что механизм растормаживания в нейронной сети позволяет реализовать специфические модификации пространственных траекторий участниками динамического процесса: отдельными информационными единицами нейронной сети, малыми группами и целыми ансамблями.

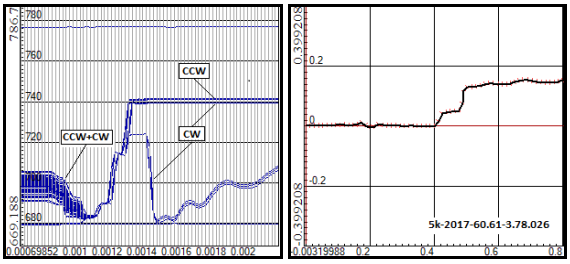
а



б



в



г

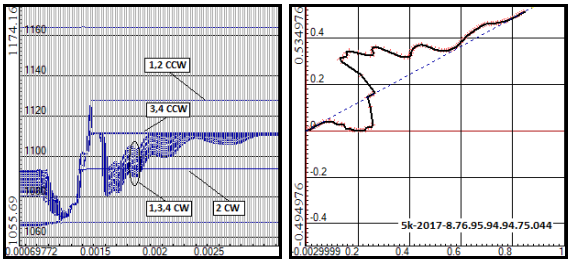


Рис. 4. Фазовые и пространственные представления сложных эпизодов, состоящих из нескольких лево- и правосторонних поворотов траектории. Выделенные на рисунке *а* и *б* слева надписи в прямоугольных рамках указывают на различные кластеры нейронов, формирующиеся в процессе кодирования рабочей памяти эпизода; в правой колонке показаны соответствующие пространственные траектории. *в* – пример произвольной уставки направления движения массовым отключением специфических групп тормозных нейронов. Долговременная гомеостатическая пластичность позволяет восстановить баланс в установочном направлении после отключения нескольких ансамблей тормозных нейронов (*г*).

Во-первых, показано, что три основных «участника» определяют нейродинамические механизмы в процессе кодирования эпизодов пространственного поведения:

- межсобытийные временные интервалы эпизода;
- амплитуды событийных сигналов;
- информационные единицы (нейроны), рекрутированные в формирование популяционных кодов.

Во-вторых, установлено, что даже на примере *ECI-networks*, содержащих всего пять ансамблей, существует избыточность нейронных микросхем, кодирующих рабочую память эпизодов, что создает большой потенциал аналогового управления двигательным поведением. И наконец, возможность реализации векторного способа кодирования эпизодов пространственного поведения и обучения сложным траекториям в окружениях, включающих препятствия и целевые ориентиры в нейронных сетях с четным циклическим торможением.

Задачей дальнейших исследований является разработка алгоритмов синаптического обучения в тормозных рекуррентных сетях, долговременного хранения и вызова памяти эпизодов пространственного поведения.

Литература

1. *Цукерман В.Д.* Нелинейная динамика сенсорного восприятия. Р-н/Д. : Изд-во РГУ, 2005. 196 с.

2. *Цукерман В.Д., Еременко З.С., Каримова О.В., Сазыкин А.А., Кулаков С.В.* Математическая модель пространственного кодирования в гиппокампальной формации. I. Нейродинамика решетчатых клеток // Математическая биология и биоинформатика. Пущино : ИМПБ РАН, 2012. Т. 7, вып. 1. С. 87–124.

3. *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. Пущино : ИМПБ РАН, 2014. Т. 9, вып. 1. С. 216–256.

4. *Karnani M.M., Jackson J., Ayzenshtat I., Tucciarone J., Manoocheri K., Snider W.G., Yuste R.* Cooperative subnetworks of molecularly similar interneurons in mouse neocortex // Neuron. 2016. V. 90. P. 86–100.

5. *Fu Y., Kaneko M., Tang Y., Alvarez-Buylla A., Stryker M.P.* A cortical disinhibitory circuit for enhancing adult plasticity // Elife. 2015. V. 27 (4). Art. e05558.

6. *Pfeffer C.K., Xue M., He M., Huang Z.J., Scanziani M.* Inhibition of inhibition in visual cortex: the logic of connections between molecularly distinct interneurons // Nat. Neurosci. 2013. V. 16. P. 1068–1076.

7. *Wolff S.B., Grundemann J., Tovote P., Krabbe S., Jacobson G.A., Muller C., Herry C., Ehrlich I., Friedrich R.W., Letzkus J.J., Luthi A.* Amygdala interneuron subtypes control fear learning through disinhibition // Nature. 2014. V. 509. P. 453–458.

Процесс архитектурного формообразования как результат геометризации архитипических режимов воображения

О.Н. Чеберева

Нижегородский архитектурно-строительный университет

Формообразование в архитектурном творчестве – процесс порождения архитектурных форм [1. С. 5] пространственным воображением, морфогенез «структурной информации» [2. С. 5] архитектуры, осуществляемый средствами мышления и воображения. Поиск принципов, методов и закономерностей процесса формообразования [1. С. 5], упорядочивание семиотических основ формы и онтологических основ теории композиции как профессиональной саморефлексии [1. С. 5] следует осуществлять в русле поиска когнитивных начал и объективизации бессознательных психофизиологических основ создания и восприятия предметного мира человеком: «Правомерность двустадийности композиционного моделирования находит подтверждение в теоретических исследованиях композиционной деятельности, раскрывающих ее двухуровневую структуру. В анализе архитектора Е.С. Пронина это *концептуальный* и *формальный* уровни. В.Л. Глазычев рассматривает сложно упорядоченный характер композиционной деятельности во взаимодействии *двух языковых горизонтов*: *языка понятий* и *визуального языка*, представляющих объемную решетку, по которой скользит композиционный замысел» [3]. В экспериментальной эстетике Г. Фехнера также упоминаются *ассоциативные* и *прямые* факторы эстетического воздействия формы. Семантика и геометрия архитектуры, как языковые структуры, должны быть рассмотрены в свете психофизиологии и когнитивистики, с учетом аффекторных и рефлексогенных образов-основ пространственного воображения и соответствующих доминант деятельности нейронной сети. Мышление следует отличать от воображения как волевой процесс создания концептов. Он опосредован и основан на бессознательных ассоциациях, связанных психологически с архетипами бессознательного; физиологически – с ассоциациями в анатомическом, т. е. аксонодендритных межнейронных связей, смысле. Активное творческое воображение [4. С. 237] осуществляет образные, мышление – силлогические операции, но основой и того и другого являются доосознанные образы, заложенные в структурах воображения субъекта филогенетически, в ходе онтогенеза и межсубъектных социальных взаимодействий.

В разных исследованиях по теории архитектуры объем понятий «архетип» и «архитип» относительно проблем формообразования существенно, порой принципиально отличается. Архитипами следует считать устойчивые и типологически узнаваемые элементы форм архитектуры и составляемые из них композиционные структуры, несущие определенные символические значения и соотносимые с эпохой, стилем. С точки зрения механизмов воображения масса, пространство, метроритмические закономерности – «архетипы» архитектурной формы [1. С. 12] и «основная проблематика теории архитектурной композиции – первичные элементы архитектуры и правила их соединения – не является ее специальным предметом. Проблемы генетических архетипов (первоэлементов архитектурной структуры), ритма, метра, пластики, пространства, архитектурной метафоры и т. д. в равной степени (если не в большей) принадлежат тому проблемному полю архитектуроведения, которое принято определять как *теория архитектуры*» [1. С. 12]. Существование архетипа ритма не имеет четкого научного обоснования [4. С. 110] в теории архитектурной композиции. Г.М. Голов отмечает «отсутствие общей теории композиции на формальном и предметном уровнях». Если к архитектурной форме как к результату процесса формообразования (интегралу «consolation» – составление однородного [1. С. 28] vs «compositio» [1. С. 28] – взаимоувязывание противоположностей) применить концепцию антропологических структур воображения ученика Юнга Ж. Дюрана [6], то фундаментальные архетипы архитектуры определяются как геометризованные проявления антропологических структур воображения, выявленных Дюраном (архетипических рефлексогенных групп образов-основ воображения). Сами устойчивые морфологические артефакты архитектуры следует именовать архитипами по аналогии с узнаваемыми типами других областей культуры. Архетипично само человеческое воображение, природное и по сути происхождения, функционирования, и по своим пространственным и морфотипическим первоисточникам. Интересны в этой связи нейропсихологические исследования археолога и антрополога Дэвида Льюиса Вильямса. Опыты выявили в воображении и моторике современных испытуемых геометрические примитивы, полностью аналогичные неолитическим пещерным изображениям: метрические линейные сетки, орнаменты, концентрические мотивы и ритмические мотивы спиралевидных форм и т. п., в настоящее время активно использующиеся теорией формальной композиции, на которой основано все современное искусство и теория формальной композиции.

Исследования Ж. Дюрана (1921–2012) опираются на рефлексологию В.М. Бехтерева, статистику психотератевтической практики Юнга и семинаров «Эранос». Концепция Дюрана полностью совместима с применяемым в настоящее время в исследованиях по теории архитектуры [7. С. 9] системно-деятельностным подходом [11. С. 3]

и относится к триаде модальностей мышления как база к надстройке. Деятельность троекта имажинера в концепции Ж. Дюрана (это само воображение, воображающий субъект и объект воображения одновременно) противостоит абсолютному началу «время-смерть» [6. С. 41]. Анализ основ режимов воображения Ж. Дюрана приводит к мысли, что в их основе лежат психофизиологические механизмы перцепции и интерпретации физических закономерностей и явлений материального мира, воспринимаемые как на основе научного знания, так и бессознательно.

Гипотезы квантового происхождения феноменов сознания, мышления, интуиции, озарения, эвристики, катарсиса, т. е. высших, не полностью объяснимых с точки зрения физиологии особенностей работы с информацией мозга человека, Р. Пенроуза и М.Б. Менского подтверждают существование сквозных для материального мира и сознания закономерностей. Соответственно, функционируют и их проекции в онтологической структуре и архетипах архитектурной формы.

Любая архитектурная форма контекстуальна, если в качестве контекста рассматривать сознание и бессознательное как отправной пункт и пункт назначения форм архитектуры в рамках системно-деятельностной парадигмы психофизики и ее связи с архетипами воображения. Рассмотрение формы с точки зрения методов пространственной геометризации антропологических структур воображения позволяет утверждать, что процесс формообразования является, по сути, механизмом этой геометризации.

При этом подробное рассмотрение архитипических режимов воображения в свете физиологии и физики приводит к естественно-научной концепции основ пространственного воображения как отражения на сознательном и на доосознанном уровне закономерностей, явлений, принципов организации материи и энергии в живой и неживой природе.

Постулярный [6. С. 46] режим воображения соответствует социогенетической [11. С. 3] модальности мышления, основными психофизиологическими механизмами которой являются «инстинкт цели» (по И.П. Павлову) и экстраполяционный (по Л.В. Крушинскому), а физиологическим фундаментом образов пространственной геометризации – биомеханические закономерности функционирования опорно-двигательного и вестибулярного аппарата человека, особенности взаимодействия с другими особями вида. В триаде Витрувия ему соответствует «польза», а в триаде И.Г. Лежавы – «функция». В трактовке А.Л. Гельфонд – функциональная форма [9. С. 106], т. е. обусловленность формы ее назначением, в том числе вся совокупность социальных смыслов формы, ее идеологии как опосредованной функции; социальная определенность формы – по Г.М. Голову [2. С. 12]. Схемой геометризации постулярных начал воображения в архитектурных формах становится их структурный каркас (динамические и статические оси формы), поскольку образом-основой этого режима является антропоморфизация в архитектуре инстинкта прямохождения, сопротивления силе тяжести (в том числе тектоника как аналог «гравитационного формования» [2. С. 15]). Постулярную основу имеют граничные формальные характеристики объектов и пространств, а также движения в целом, в том числе схемы целеполагания, функциональные маршруты и т. п. Связующим формальные и семантические основы постулярного режима пространственного воображения звеном становятся геометрические метафоры физических явлений: конфигурации полей сил, траектории, направления и опорные, отправные точки усилий, сил, воздействие направленной кинетической энергии. По визуальному представлению эти метафоры очень близки к математическим концептам, которые в символической форме используются в формулах естественных наук, и на этом абстрагировании до схемы концепта основаны и «Начала» Эвклида. Постулярному началу пространственного воображения анатомически соответствуют преимущественно проприоцептивные сигналы (с рецепторов мышц, сухожилий, суставов) и соответствующие им возбуждения композиций нейронов.

Реализация постулярных начал воображения в архитектурной форме происходит в основном в структуре статических и динамических (тонических) осей, а также проявляется при градиентном распределении визуальной массы вдоль этих осей.

Дигестивный режим воображения [6. С. 301] соответствует онтогенетической [11. С. 3] модальности мышления, его физиологической основой является пищевой инстинкт, потребность в потенциальной энергии для построения систем и индивидуального роста конкретного организма (этот процесс и является онтогенезом). Метафора дигестивного режима в архитектуре – масса. В триаде Витрувия ему практически соответствует «прочность», в триаде И.Г. Лежавы – «конструкция», по матрице А.Г. Гельфонд – конструктивная форма [9. С. 106], в лекциях Г.М. Голова ей более всего отвечает материально-техническая определенность формы [2. С. 12]. Основой ментальных репрезентаций режима «массы» выступают материальные тела и шире – вещество в плотном, конденсированном состоянии. Анатомически при включении дигестивного режима доминируют интероцептивные (с рецепторов внутренних органов) сигналы центральной нервной системы (ЦНС).

Реализация дигестивных начал воображения концентрируется в соотношении массы и пространства в форме архитектуры.

Копулятивный [6. С. 48] режим воображения следует трактовать шире поля значений опорного термина – как ритмизующий, т. е. организующий членения, интервалы, пропорции массы и пространства. Он отражает биофизику филогенетически присущих человеку физиологических процессов высшей нервной деятельности, соответствуя одноименной (филогенетической [11. С. 15], т. е. именно антропогенной) модальности мышления. Смыслообразующий подтекст ритмизации – из-

менчивость как важнейшее свойство жизни, необходимое для выделения отдельных ощущений и состояний (радость, горе), функциональный – переход от одного процесса к другому, от одного режима к следующему, что действует на психику гармонизирующе. Общим физическим смыслом и архетипической базой копулятивных начал воображения является волновая, т. е. колебательная, природа вещества как такового, в том числе биомассы. В триаде Витрувия проявление ритмизующих начал воображения обозначено термином «красота», в триаде И.Г. Лежавы [8. Т. 2. С. 3] ему соответствует понятие «форма», в матрице А.Г. Гельфонд максимальному его проявлению отвечает понятие формальной формы [9. С. 106], в лекциях Г.М. Голова – эстетическая определенность формы [2. С. 12]. Физиологическая основа – сигналы экстероцептивных рецепторов (кожных, зрительных, слуховых, обонятельных), прекогнитивная интроцепция электрогенеза (переменные токи) головного мозга и ЦНС, низкоэнергетических электромагнитных полей клеток тела.

«Главный признак произведения архитектуры – *пространство*» [5. С. 5], противопоставленное массе формы, соответствует антитезе троекта имажинера «времени-смерти». Время (согласно теории относительности) и смерть (как биологическая, так и общекультурная – прекращение памяти) существуют в физическом смысле лишь там, где наличествуют соответственно материя, т. е. вещество в конденсированном состоянии, и жизнь. Режимы воображения осваивают пространство как объективную (т. е. существующую безотносительно имажинера) реальность. Художественной метафорой, предельной гиперболой смысла «времени-смерти» является антимасса, т. е. пустота, вакуум, энергия нулевых колебаний, первоисточник вещества, мира неживой и живой природы: «Пространство противостоит архитектурной форме, а с другой стороны, организуется ею» [8. Т. 1. С. 91].

Проецирование концепции Дюрана на формообразование в архитектуре модифицирует понимание масштаба форм как следствия взаимодействия копулятивного (ритмизующего) и дигистивного режимов воображения (филогенетической и онтогенетической модальностей мышления согласно системно-деятельностной парадигме психофизиологии [11. С. 3]). Точка, являющаяся с точки зрения естественно-научной лишь математическим допущением, не может иметь физического смысла, поскольку положение бесконечно малых объектов (это объекты квантового мира) согласно принципу неопределенности Гейзенберга не измеримо с достаточной для геометрического описания точностью. Поэтому она не может быть «оператором» морфогенеза на семантическом уровне, но лишь инструментом формального структурного описания формы. С точки зрения механизмов геометризации архетипов воображения точка – обозначение «переключения» работы воображения с одного режима на другой.

Непосредственной определяющей базой архетипов воображения и условием функционирования мышления и его модальностей, т. е. всей основы морфогенеза, равно как и материальных модальностей самой архитектурной формы, являются физические процессы. Развитие номенклатуры общепринятых приемов архитектурного формообразования, как дигитальных, так и методологических, идет в русле принципиального природоподобия с активным привлечением областей естественно-научного знания.

Единство основ теории композиции и формообразования отражает термин «физиомиметика» (phisiomimetics), введенный Р. Соаром [10] для моделирования жестких пространственных структур зданий по аналогии с молекулярными неорганическими решетками, как название метода морфогенеза. Понятие *физиомиметики* («физио» – природа, «мимезис» – подобие) обозначает всеобщую парадигму формообразования, так как в объем понятия входят биомиметика (бионика), цитирование форм и методов их образования в неживой природе, а также «основания для новых занятий теорией композиции» [1. С. 7], включающие «прежде всего и по преимуществу так называемые неорганические параметры, характеристики архитектурной формы, каковыми являются коллаж, палипмсест, цитата, ирония» [1. С. 8]. В основе любых операций логического и художественного плана лежит осознанное или бессознательно-архетипическое (апперцепция индивидуума) отображение природных закономерностей антропологическими структурами воображения: «сознание как психический феномен на самом деле тождественно квантово-механическому понятию выбора альтернативы» [12. С. 156].

Следовательно, весь формально-композиционный инструментарий зодчего появляется в результате пересечения четырех образов-основ пространственного воображения, которыми являются материал архитектуры (масса / пространство) и средства его организации (метроритмические закономерности / оси построения), находящихся в парном соответствии, близком к комлементарному. В геометризованном виде они становятся «операторами» трехмерной формы, связывающими воедино ее формальные («структурная информация» [2. С. 25]) и семантические характеристики. То или иное количественное соотношение и качественное проявление «операторов» образует все многообразие исторически сложившихся композиционных схем и форм архитектуры. Анализ формы как совокупности параметров геометризации архетипических образов-основ пространственного воображения открывает новые пути к пониманию формального языка архитектуры и прогнозированию его опосредованного влияния на психологию индивидуума и общества в целом.

Рассмотрение истории архитектуры как развития гомологических рядов архитектурной формы, а самой формы как производной четырех пространственных операторов – беспредметных психофизиологических ассоциаций – дает следующие инте-

ресные результаты. Архитектурная форма – это информационная структура, система закодированной информации в стереометрических элементах формы / пространства, являющаяся отображением многомерных данных системы высших психических функций, которая в то же время является и их фильтром и заключает механизмы преобразования (рис. 1, 3). Дифференциацию режимов воображения производил Ж. Дюран, опираясь на труды В.М. Бехтерева. Троект имажинера Ж. Дюрана: воображающий – воображение – воображаемое является трехступенчатым отображением, представление которого в виде графа выявляет структуру троекта, идентичную когнитому К.В. Анохина.

Рис. 1. Простые формально-композиционные свойства на оси структурной информации (по Г.М. Голову, доп. О.Н. Чеберевой)

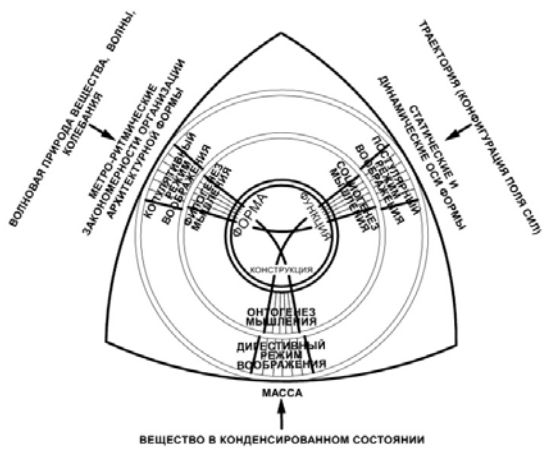


Рис. 2. Схема механизмов мимезиса природных закономерностей формообразования в архитектуре

Система высших психических функций характеризуется динамическими доминантами. Принцип доминанты Ухтомского применим к стратегиям зрительного восприятия, изученным Арнхеймом. Доминанта как раз и может служить тем самым определяющим фактором, который интегрирует ощущения в процессе визуального восприятия в целую картинку-гештальт. Лингвосемиотический подход к архитектуре не смог объяснить многообразия данных архитектуры как инфосистемы, собранной из элементов «загадочных означающих». Определение механизмов кодирования многомерных информационных данных в символических структурах форм архитектуры – актуальная проблема теории архитектуры, по С. Агафонову, Д. Мелодинскому, Ю. Янковской и др.

Любая архитектурная форма может быть представлена в виде векторного поля, изменения структуры которого и сложности описания характеризуют смену парадигмы структурно-композиционного формообразования. Смены этих парадигм определенным образом связаны во времени с революциями парадигм естественно-научного знания (рис. 4). Рассмотрение архитипических режимов воображения в свете физиологии и гипотезы о принципе физиомиметики как основы пространственного воображения (рис. 2) ведет к естественно-научной концепции воображения – отображения на сознательном и на доосознанном уровне закономерностей, явлений, принципов организации материи и энергии в живой и неживой природе.

Физиологическая основа – сигналы экстероцептивных рецепторов (кожных, зрительных, слуховых, обонятельных), прекогнитивная интроцепция электрогенеза головного мозга, низкоэнергетических электромагнитных полей клеток тела. По А.А. Ухтомскому, влиянием доминант определяются впечатления, образы, убеждения. Пирамида самоактуализации личности А. Маслоу, сформированная на основе учения Ухтомского, отражает «восходящую» последовательность доминант от низших к высшим. Три функциональных режима воображения, по Ж. Дюрану (дигистивный, копулятивный и постулярный), при анализе архитектурной формы следует называть: режим массы, режим метроритмизации, режим тонической структуры. Доказательство связи принципа доминанты психофизиологии с системой геометрии архитектурной формы возможно путем представления онтологических категорий архитектуры – функции, конструкции, формы – в виде множеств координат стереометрических компонент. Но в общем виде (древнеегипетское зодчество, в частности пирамиды, характеризует преобладание массы: готика и барокко актуализируют вертикали – постулярное начало и т. п.) очевидно, что последовательность актуализации режимов воображения на протяжении истории архитектуры и пирамида самоактуализации А. Маслоу по структуре полностью идентичны.

Предположительно, история архитектуры, развитие архитектурных форм и стилей может служить иллюстрацией процессов глобальной самоактуализации человечества.

Связь учения о доминанте с понятием архитектуры как неизбежного искусства – научное изучение опосредованного влияния на массовое сознание. Рассмотрение формы под таким углом позволяет провести обоснованные аналогии между музыкальной и архитектурной композициями, имеет целью составить стратегию изучения психофизиологии восприятия архитектуры и системную, обоснованную научно стратегию соответствующего исследования архитектурной формы.

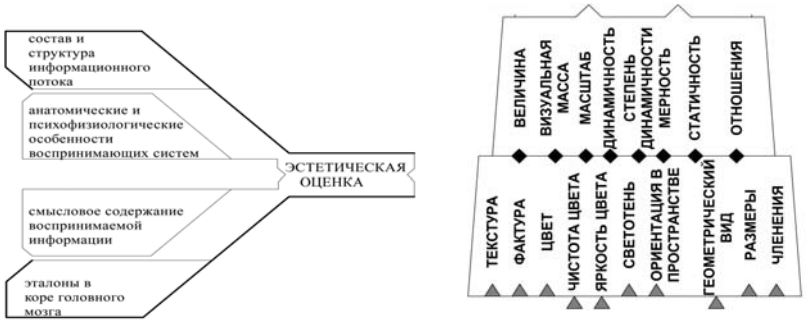


Рис. 3. Дуализм формального и символического начал эстетической оценки архитектурной формы при восприятии (по А.В. Шаповалу)

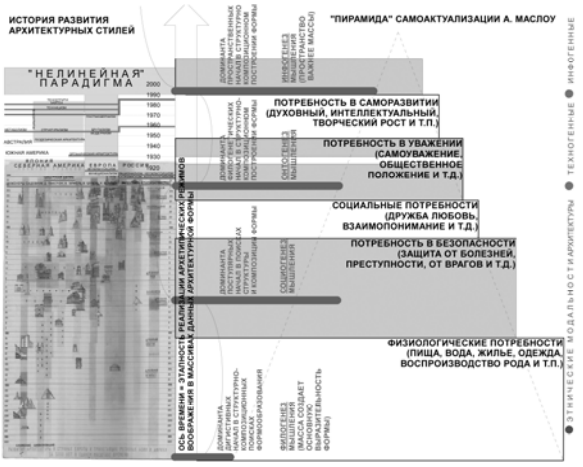


Рис. 4. Предварительный графический анализ актуализации режимов воображения в истории архитектуры на основании дополненной «периодической» системы архитектурных стилей С.Л. Агафонова

Одной из важнейших задач является изучение и прогнозирование влияния визуальных монотонных сред и сред с доминированием одного оператора на интеллектуальную, социальную активность человека в урбанизированном пространстве.

Литература

1. *Азизян И.А., Добрицына И.А., Лебедева Г.С.* Теория композиции как поэтика архитектуры. М. : Прогресс-Традиция, 2002. 568 с.
2. *Голов Г.М.* Краткий конспект лекций по формообразованию. Н. Новгород, 2011. [Рукопись].
3. *Рочегова Н.А.* Компьютерное моделирование в процессе формирования основ архитектурной композиции (начальная стадия высшего профессионального образования) : автореф. дис. докт. архитектуры / Н.А. Рочегова ; Моск. архит.-строит. ин-т. М., 2010. [27] с.
4. *Мелодинский Д.Л.* Традиционные и современные формы ритма в архитектуре // Известия вузов. Сер. «Строительство». 2004. № 6. С. 109–155.
5. *Иконников А.В.* Функция, форма образ в архитектуре. М., 1986. 288 с.
6. *Durand G.* Les structures anthropologiques de l'imaginaire. Paris : DUNOD, 1992. 536 p.
7. *Янковская Ю.С.* Архитектурный объект: образ и морфология : автореф. дис. докт. архитектуры / Ю.С. Янковская ; Моск. архит.-строит. ин-т. М., 2006. [32] с.
8. *Лежава И.Г.* Функция и структура формы в архитектуре : дис. докт. архитектуры : в 2 т. / И.Г. Лежава ; Моск. архит.-строит. ин-т. М., 1987. [266] с.
9. *Гельфонд А.Л.* Деловой центр как новый тип общественного здания : монография. Н. Новгород : Нижегор. гос. архит.-строит. ун-т, 2002. 131 с.
10. *Soar R.* Physiomimetics: A Process Architecture and Construction Paradigm : [Электронный ресурс]. Series: Adaptive Ecologies Evening Lecture Series. Date: 18/2/2013. Режим доступа: http://www.aaschool.ac.uk/VIDEO/lecture.php?ID=2073.
11. *Гусев А.Н.* Психофизика сенсорных задач. Системно-деятельностный анализ поведения человека в ситуации неопределенности. М. : Изд-во Моск. гос. ун-та ; МПК «Психология», 2004. 316 с.
12. *Менский М.Б.* Человек и квантовый мир: Странности квантового мира и тайна сознания. Фрязино : Век-2, 2005. 320 с. (Наука для всех).

О возможности разрешения научных парадоксов в искусственной когнитивной системе

О.Д. Чернавская[1], Я.А. Рожило[2], Д.С. Чернавский[1]

[1] Физический институт РАН, Москва
olgadmitcher@gmail.com
[2]BICA Labs, Киев

Введение

Мы продолжаем цикл работ [1–4] по моделированию процесса человеческого мышления в рамках естественно-конструктивистского подхода (ЕКП). В основе ЕКП лежат динамическая теория информации (ДТИ) [5], данные нейрофизиологии [6, 7], нейропсихологии [8] и нейрокомпьютинга (известные нейропроцессоры типа Хопфилда [9] и Гроссберга [10], однако в континуальном представлении концепции динамического формального нейрона [2, 3]).

В сравнении с другими современными подходами, такими как схемы *Active Agent* [11, 12], *Reverse Brain Engineering* [13] и др., ЕКП наиболее близок к парадигме *Deep Learning* [14], однако имеет несколько принципиально важных отличий. Естественно-конструктивистская когнитивная архитектура (ЕККА), предложенная и разработанная в рамках подхода, позволяет интерпретировать и имитировать важные аспекты именно человеческого мышления – непредсказуемость, индивидуальность, эмоциональность, интуитивное мышление. Несколько аспектов приложения ЕККА обсуждались недавно [15, 16]. В данной работе мы обсудим довольно узкую проблему – возможность выявлять и разрешать научные парадоксы в рамках ЕККА.

О природе научных парадоксов

Научные парадоксы могут рассматриваться как противоречие между наборами аксиом, относящихся к описанию одного и того же реального объекта. Следует подчеркнуть, что это противоречие может появиться только в нашем описании объекта / эффекта / явления, а не в Природе. Природа никогда не противоречит самой себе, тогда как любое научное описание представляет собой определенную идеализацию реальных явлений, для чего игнорируются некоторые (казалось бы, нетипичные) особенности. Очевидно, что единственный способ разрешить научный парадокс – пересмотреть наборы аксиом и создать некоторую новую аксиому, которая могла бы помочь объединить исходные множества, устранив тем самым противоречие. Рассмотрим некоторые наиболее известные примеры научных парадоксов.

Механика против статистической физики

Наиболее яркий пример научного парадокса, который был сформулирован в XIX и разрешен в XX веке, связан с противоречием между механикой и статистической физикой и термодинамикой. Эта проблема была сформулирована Л. Больцманом [17], а решена позднее в работах Н.С. Крылова [18] и Я.Г. Синая [19]. Суть заключается в следующем. Согласно законам Ньютона, все процессы в механической системе должны быть строго определены и обратимы во времени; информация о положении и скорости частицы в исходном состоянии должна обеспечивать возможность полной реконструкции последующей траектории. В то же время термодинамика описывает те же механические частицы, но большое количество частиц приводит к тепловому равновесию и концепции увеличения энтропии как меры беспорядка [20]. Другими словами, эти системы предсказуемы только на макроуровне, а информация о микроуровне, очевидно, теряется. Сначала казалось, что разрыв между этими двумя крайними взглядами на механическую систему относится к числу частиц: при $n >> 1$ количество микроинформации превышает пропускную способность системы. Однако не ясно, какое состояние должно быть при $n \sim 1$ и каков механизм перехода от классической механики к термодинамике и статистической механике. Только после работ по «бильярду Синая» [19] выяснилось, что основным условием для этого перехода является *неустойчивость* движения частицы, что приводит к непредсказуемым и необратимым траекториям. Другими словами, именно неустойчивость обеспечивает возрастающую энтропию и переход к статистической механике.

Принцип комплементарности в квантовой механике

Два основных принципа квантовой механики фактически противоречат друг другу. Первый принцип – уравнение Шредингера [21] для волновой функции $\Psi(x, t)$ – основан на предположении о том, что система имеет нулевую энтропию и может быть описана динамическим (обратимым) уравнением. Второй принцип гласит, что *вероятность* обнаружить частицу в точке (x, t) пропорциональна квадрату модуля волновой функции $\Psi^2(x, t)$, что явно относится к статистическому подходу к описанию ансамбля частиц. Парадигма *дополнительности* (комплементарности) Бора [22], которая, как считается, снимает противоречие, заключается в идее просто сложить эти два принципа, невзирая на их противоречивость. То есть этот парадокс остается фактически неразрешенным, и проблема согласованности квантовой механики все еще существует.

Когнитивная архитектура в ЕКП

В основе ЕКП лежит динамическая теория информации (ДТИ), предложенная и разработанная Д.С. Чернавским [5]. Эта теория представляет исследование процесса возникновения и эволюции информации в живой системе. Напомним кратко несколько наиболее важных выводов ДТИ.

- Информация (по Кастлеру [23], «запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных») может возникать благодаря ***рецепции*** – выбор, предопределенный (продиктованный) извне, или ***генерации*** – свободный (случайный) выбор самой системы, требующий присутствия случайной компоненты (шум). Эти процессы *дополнительны* и должны проходить в ***двух разных*** (связанных) подсистемах.
- Информация разделяется на ***объективную*** **(*безусловную*)** и ***субъективную (условную)***. *Объективная* информация представляет собой фактически рецепцию явлений и законов Природы. *Субъективная* (условная) информация возникает в живой системе как выбор, сделанный *коллективом субъектов* в процессе их взаимодействия (соревнования, борьбы, договоренности, условности). Этот выбор не должен (да и не может быть) быть *лучшим* (наиболее эффективным или целесообразным), он просто должен быть сделан. Фактически, именно эта информация определяет индивидуальность когнитивной системы. Ярким примером условной информации является язык.
- Процесс мышления рассматривается как процесс *записи (генерации), сохранения (рецепции), кодирования, генерации и распространения своей условной информации*.

Именно эти выводы ДТИ легли в основу когнитивной архитектуры ЕККА, предложенной и разработанной в работах [2, 4]. Напомним кратко основные особенности ЕККА, схема которой представлена на рис. 1.

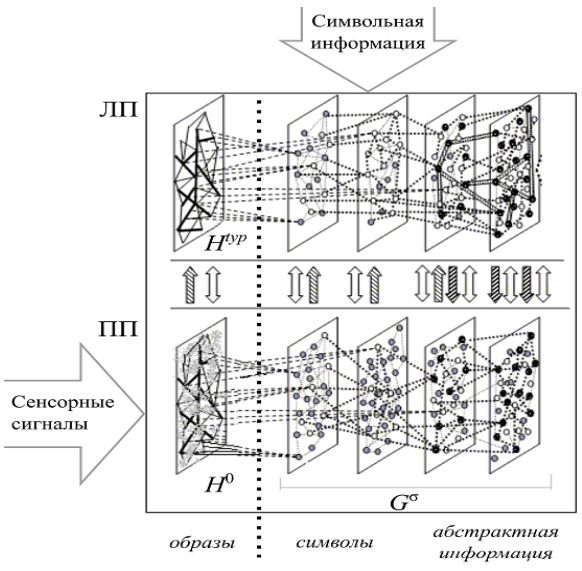


Рис. 1. Схема когнитивной архитектуры ЕККА

Вся система представляет собой сложную многоуровневую иерархическую комбинацию взаимодействующих нейропроцессоров. Нулевой уровень иерархии представлен пластинами типа Хопфилда, которые получают сенсорные сигналы от реальных объектов и записывают эту информацию в виде *образов* (распределенная память). Фактически, эта информация является почти *объективной*, поскольку порождена внешними сигналами, воспринимаемыми нейронами мозга.

Все последующие уровни иерархии $\sigma = 1, \ldots, N$ представлены процессорами типа квази-Гроссберга, т. е. процессорами локализации, предложенными и разработанными в рамках ЕКП [1–3]. Каждому образу на пластине $\boldsymbol{H}$ (цепочка возбужденных нейронов) ставится в соответствие один *нейрон-символ* на следующем уровне $\boldsymbol{G}^1$. Подчеркнем, что здесь процесс локализации регулируется *только* конкурентным взаимодействием нейронов процессора, а не соображениями эффективности. В результате все возникающие символы представляют яркий пример *субъективной (условной)* информации (свободный выбор «коллектива нейронов»), индивидуальной для данной системы.

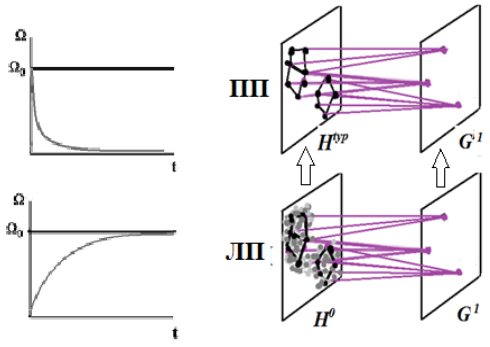
Основная конструктивная особенность ЕККА состоит в том, что вся система разделена на две подсистемы, **ПП** (правая подсистема) и **ЛП** (левая подсистема), по аналогии с полушариями человеческого мозга. **ПП** отвечает за генерацию новой информации (обучение, творчество), а **ЛП** – за обработку хорошо известной информации (распознавание, прогноз и т. п.). Подчеркнем, что данный вывод, сделанный нами только на основе ДТИ, совпадает с практическим выводом психолога Е. Голдберга [8], что косвенно подтверждает правильность умозаключений. В рамках ЕКП данная специализация обеспечивается тремя факторами:

- наличие шума в **ПП** позволяет генерировать новую информацию;
- все связи в **ПП** обучаются по принципу Хебба усиления нужных связей [7], а в **ЛП** – по принципу Хопфилда «отсечение ненужного» [9];
- **ПП** работает как «супервайзор» для **ЛП** благодаря самоорганизующему принципу «почернения связей».

Проиллюстрируем последний принцип на примере небольшого фрагмента двух первых уровней ЕККА (рис. 2).

Информация от сенсорных сигналов поступает на нейропроцессор типа Хопфилда $\boldsymbol{H}^0$ в **ПП**, где каждому реальному объекту ставится в соответствие некий *образ*, т. е. цепочка активных нейронов. Связи Ω между активными нейронами обучаются «по Хеббу», т. е. усиливаются (рис. 2, *а*, нижняя часть). Когда связи достигают состояния Ω_0 («черные» связи), информация об образе передается прямыми подсистемными связями Λ в **ЛП** на процессор $\boldsymbol{H}^{typ}$ для запоминания, сохранения и распознавания. В этой подсистеме связи должны обучаться согласно оригинальному принципу Хопфилда «отсечение лишнего» [9]: все связи из-

начально сильные («черные»); в процессе обучения «лишние» связи (между активными и незадействованными нейронами) постепенно отмирают (рис. 2, *а*, верхняя часть).



а *б*

Рис. 2. Иллюстрация к принципу почернения связей: *а* – динамика обучения связей в **ПП** и **ЛП**; *б* – фрагмент двух первых уровней ЕККА

Следует подчеркнуть, что в процессе обучения не все активированные нейроны играют одинаковую роль. Некоторые нейроны активируются при каждом представлении объекта («*кор*-нейроны»), и связи между ними достигают необходимого («черного») состояния быстро. Фактически, эти нейроны соответствуют *типичным признакам* данного объекта; именно они составляют типичный образ на пластине $\boldsymbol{H^{пр}}$ в **ЛП**. Другие нейроны активируются лишь редко, при некоторых нетипичных представлениях объекта («*гало*-нейроны»); связи между ними остаются сравнительно слабыми («серыми»). Эти нейроны соответствуют *нетипичным* признака данного объекта, и информация о них представляется «неважной» и редуцируется (не передается в **ЛП**). Подчеркнем, однако, что при такой редукции могут теряться некоторые ассоциативные связи между разными объектами (на рис. 2, *б* все три представленных образа в процессоре $\boldsymbol{H^0}$ связаны ассоциативно, а в процессоре $\boldsymbol{H^{пр}}$ один из них оказывается абсолютно изолирован от остальных).

Таким образом, процессор $\boldsymbol{H^0}$ содержит *всю* объективную информацию о представленных реальных объектах, даже их нетипичные признаки, записанные гало-нейронами и «серыми» связями – потому этот процессор называется еще «размытое множество». Информация, хранящаяся здесь, является *скрытой* (латентной), индивидуальной для данной системы. В определенном смысле размытое множество представляет собой аналог человеческого подсознания.

На следующем этапе (рис. 2, *б*) кор-нейроны образов участвуют в формировании соответствующих символов на следующем уровне иерархии – в процессоре $\boldsymbol{G^1}$. После формирования символа и его связей с соответствующими нейронами образа он получает право участвовать в *кооперативном* (хеббовском) взаимодействии с другими символами, формируя так называемые *обобщенные* образы, или *образ-из-символов*. Эти образы получают свои символы на следующем иерархическом уровне и т. д. Эта процедура повторяется на всех уровнях иерархии.

На верхних уровнях иерархии возникают *абстрактные* понятия и символы-концепции – такие, как *бесконечность, наука* и т. д. Они не имеют «материального» содержания, т. е. не соответствуют какому-либо реальному образу. Как и другие символы, они содержит уже *условную* (субъективную, редуцированную) информацию о реальных объектах, созданную самой системой.

Подчеркнем, что редукция информации происходит на каждом этапе передачи ее из **ПП** в **ЛП**. Гало-нейроны и нечеткие («серые») связи в **ПП** представляют собой индивидуальный «опыт» системы, что можно ассоциировать с интуицией.

Выявление и разрешение парадоксов

Как видно из рис. 1, символы на высоких уровнях иерархии связаны с большим количеством символов на более низких уровнях и в конечном счете с большим количеством образов. Эти символы представляют собой концепции (в частности, понятие «научная дисциплина»), которые не могут быть интегрированы (объединены).

Противоречивая информация возникает именно в процессе пренебрежения нетипичными признаками, поскольку типичные образы (вместе с соответствующими символами) оказываются слишком упрощенными, а ассоциативные связи между образами истощаются. Это приводит к тому, что символы высокого уровня, соответствующие сложным многофункциональным процессам (например, «символы научной дисциплины»), не могут быть интегрированы, т. е. между ними нет (казалось бы) никаких связей. Этот эффект представляет *научный парадокс*. Чтобы разрешить этот парадокс, система должна разложить символы высокого уровня до уровня образов и активировать размытое множество $\boldsymbol{H^0}$ в **ПП**, чтобы выявить потерянные («серые», т. е. слабые) ассоциативные связи. Этот процесс должен привести к формированию нового символа, включающего общие «нетипичные» признаки (гало-нейроны), что и может разрешить данный парадокса.

До сих пор мы обсуждали особенности появления субъективной символической информации в рамках единой индивидуальной когнитивной системы. Однако аналогичные принципы контролируют формирование различных научных дисциплин. Фактически, любая дисциплина представляет собой редуцированное описание природных явлений, поэтому имеет строгий диапазон применения. Необходимо извлечь наиболее характерные черты данного явления и выявить основные закономерности их поведения, пренебрегая некоторыми несущественными (по-видимому) атрибутами – в противном случае никакая разумная рабочая модель не может быть построена. Однако противоречия между разными подходами часто возникают именно из-за пренебрежения определенными нетипичными (несущественными) атрибутами. Выявление ассоциативных связей между символами высокого уровня, которые традиционно не учитывались как нетипичные, можно рассматривать как научное открытие.

Возвращаясь к парадоксу между классической и статистической механикой, можно сделать вывод, что роль общего гало-нейрона играет свойство *неустойчивости.* Неустойчивые процессы первоначально рассматривались как нетипичные (несущественные) для классической механики. С другой стороны, возможность получения необратимой траектории даже для одной частицы, движущейся в особых граничных условиях, таких как бильярд Синая, казалась несущественной (нетипичной) для статистической механики. Таким образом, очень важная особенность, которая фактически устраняет парадокс, была утрачена в обеих научных дисциплинах.

Заключение

Показано, что научные парадоксы, т. е. противоречивое описание одних и тех же природных явлений в рамках разных научных дисциплин, возникают в результате различной условной (субъективной) информации, принятой в рамках этих дисциплин. В рамках ЕКП этот эффект можно было естественно объяснить и воспроизвести в искусственной когнитивной системе ЕККА.

Важнейшей особенностью ЕККА является разделение всей системы на две связанные подсистемы, **ППП** и **ЛПП**. Фактически, **ЛПП**, ответственная за обработку хорошо известной информации, аналогична многим другим стандартным схемам искусственных когнитивных систем, однако в ЕККА она формируется после и на основе **ППП**. Благодаря хеббовскому принципу обучения связей в **ППП**, она обеспечивает запись новой информации и содержит много информации, которая кажется в данный момент несущественной. Затем **ЛПП** служит для извлечения и выбора типичной информации для дальнейшей обработки (распознавание, прогноз и т. д.). Однако именно несущественная (нетипичная) информация играет важную роль в выявлении и разрешении научных парадоксов.

Интеграция (слияние) символов высокого уровня иерархии, относящихся к разным научным дисциплинам, устраняющая научные парадоксы, фактически представляет собой творческую работу, которую ЕККА действительно могла бы сделать. Показано, что эти проблемы должны решаться путем разложения абстрактных символов-концепций до низшего уровня архитектуры, «размытого множества» $\boldsymbol{H}^0$ в подсистеме **ППП**. Этот процессор играет особую роль и может ассоциироваться с человеческим подсознанием.

Отметим, что этот механизм может работать только в случае богатого репертуара, хранящегося в размытом множестве $\boldsymbol{H}^0$. Это же утверждение может быть отнесено и к человеку: научное открытие требует глубокого понимания, большой эрудиции и большого опыта.

Литература

1. *Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.* Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Ч. II : Понятия «образ» и «символ» как инструменты моделирования процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Сложные Системы. 2012. № 2. С. 47–67.

2. *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 Architectures. 2013. V. 6. P. 147–158.

3. *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.

4. *Chernavskaya O.D.* [*et al.*] An architecture of the cognitive system with account for emotional component // BICA. 2015. V. 12. P. 144–154.

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

6. Основы психофизиологии / под ред. Ю.И. Александрова. М. : ИнфраМ, 1998.

7. *Hebb D.O.* The organization of behavior: a neuropsychological theory. New York, 2002. P. 457.

8. *Goldberg E.* The Wisdom Paradox: How Your Mind Can Grow Stronger As Your Brain Grows Older. Gotham, 2006.

9. *Hopfield J.J.* Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // PNAS. 1982. V. 79. P. 2554.

10. *Grossberg S.* Studies of Mind and Brain. Boston : Riedel, 1982.

11. *Laird J.E.* The Soar Cognitive Architecture. MIT Press, 2012.

12. *Samsonovich A.* Emotional biologically inspired cognitive architecture // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2013. V. 6. P. 109–125.

13. *Koziol L.F., Budding D.E.* Subcortical Structures and Cognition. Implicationsfor. Neurophysiological Assessment. Springer, 2009.

14. *Deng L., Yu D.* Deep learning: Methods and Applications // Foundations and Trends in Signal Processing. 2013. V. 7 (3/4). P. 197–387.

15. *Chernavskaya O.D., Rozhylo Ya.A.* On Possibility to Imitate Emotions and a Sense of Humor in an Artificial Cognitive System // Proc. of 8th International Conference COGNITIVE. 2016. P. 42–47.

16. *Chernavskaya O.D., Chernavskii D.S., Rozhylo Ya.A.* On the modelling an Artificial Intelligence Basing on the Human Brain Architecture // Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering. 2016. P. 107–121.

17. *Boltzmann L.* Further Studies on the Thermal Equilibrium of Gas Molecules // The Kinetic Theory of Gases. History of Modern Physical Sciences. 1872. V. 1. P. 262–349.

18. *Krylov N.S.* Works on the Foundations of Statistical Physics. 2014.

19. *Sinai Ya.G.* On the foundation of ergodic hypothesis for a dynamical system of statistical mechanics // Sov. Math. Dokl. 1963. V. 4. P. 1818–1822.

20. *Ehrenfest P., Ehrenfest-Afanassjewa T.* The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics. Ithaca Cornell University Press, 1959.

21. *Schroedinger E.* Abhandlungen zur Wellenmechanik. Leipzig, 1927.

22. *Bohr N.* Foundation of Quantum Physics // Niels Bohr Collected Works. V. 6. Jorgen ; Amsterdam : Elsevier, 2008.

23. *Quastler H.* The emergence of biological organization. Yale University Press, 1964.

Поле внимания при реализации синхронного перевода

Т.В. Черниговская[1], А.А. Конина[1], С.В. Алексеева[1], М.А. Кнабенгоф[2]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет
tatiana.v.chernigovskaya@gmail.com
alena.konina@gmail.com
alexeeva.ru
[2] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
marisyaspb@outlook.com

Синхронный перевод неоднократно относили к категории самых высокозатратных профессий [1, 2, 6]. По всей видимости, процесс перевода не сводится к слушанию сообщения, его переводу и производству на другом языке. Мы считаем, что одной из возможных отличительных особенностей синхронных переводчиков является расширенное поле внимания, за счет которого они успешно координируют наложение внутреннего потока информации (перевода) на внешний поток (исходный аудиосигнал). Чтобы проверить данное предположение, мы провели исследование с применением методики регистрации движений глаз, в котором сравнили синхронных переводчиков во время выполнения ими своей профессиональной деятельности и контрольную группу, осуществляющую задание, сопоставимое с синхронным переводом по когнитивной сложности и энергозатратности. Наша гипотеза состояла в том, что поле внимания у синхронных переводчиков будет шире, чем у контрольной группы.

Наша вторая гипотеза заключалась в том, что информация, попадающая в поле внимания синхронных переводчиков, будет обрабатываться ими лучше, чем контрольной группой испытуемых, осуществляющей сопоставимое задание. Это предположение следует из ресурсной теории распределения когнитивных усилий [4].

Эксперимент

Движения глаз записывались с помощью прибора регистрации движений глаз Eyelink 1000Plus с частотой регистрации взгляда 500 Гц при свободном положении головы.

Переводчики (родной язык – русский) в течение 6,5 мин выполняли синхронный перевод с русского языка на английский язык текста, зачитываемого диктором. Видеозапись показывает, что диктор сидит за столом в окружении 20 объектов, не связанных с содержанием его сообщения. Во время выполнения перевода регистратор движений глаз фиксировал место положения взгляда испытуемого (диктор, объекты или фон) и длительность каждой фиксации. Сразу после этого задания испытуемые проходили тест на припоминание (20 объектов, которые присутствовали на видео, и 40 дистракторов) и отвечали на вопросы по содержанию текста.

Контрольная группа должна была повторять текст на русском языке вслед за диктором на видеозаписи (эхо-повтор) [3], нажимать на одну кнопку, когда диктор смотрел в камеру, и на другую кнопку, когда диктор называл имена собственные, что создавало ситуацию существенной когнитивной нагрузки, схожей с той, которую испытывают синхронные переводчики. Движения глаз во время выполнения эхо-повтора записывались. Далее, как и в группе синхронных переводчиков, испытуемым необходимо было вспомнить объекты, которые присутствовали на видео, и ответить на вопросы по содержанию текста.

В группу переводчиков входили 6 синхронных переводчиков (5 женщин) в возрасте от 22 до 29 лет с опытом работы по профессии от года до пяти лет.

В контрольной группе было 17 человек (11 женщин) от 20 до 32 лет с хорошим знанием английского языка, но без опыта последовательного или синхронного перевода.

Результаты

Несмотря на то что разница в средней длине фиксации по группе кажется значительной (372 мс для переводчиков и 396 мс для контрольной группы), она не достигла статистической значимости (t-тест, $p = 0{,}27$). Тем не менее группы статистически значимо различаются по времени, которое испытуемые затратили, рассматривая диктора: 68 и 87 % соответственно (t-тест, $p = 0{,}014$). Данный результат показывает, что синхронные переводчики гораздо чаще уводят взгляд с диктора (главного объекта внимания) и исследуют обстановку, представленную на видео. Таким образом, в их распоряжении остается больше когнитивных ресурсов, чтобы воспринять иррелевантную для основного задания информацию. Для того чтобы ответить на вопрос о том, как иррелевантная информация обрабатывается синхронными переводчиками / контрольной группой, рассмотрим результаты теста на припоминание.

Метод смешанной логистической регрессии с точностью ответа (правильно / неправильно) в качестве зависимой переменной, типом задачи (синхронный перевод vs. сложная задача / эхо-повтор) в качестве межгруппового фактора, типом картинки (целевая / дистрактор) в качестве внутригруппового фактора, их взаимодействием и учетом вариативности по отдельным испытуемым и картинкам в качестве случайных эффектов показал, что хотя в целом синхронные переводчики справляются с тестом хуже ($p = 0{,}001$), чем контрольная группа (57 vs. 61 % правильных ответов), данное ухудшение вызвано неправильным опознанием дистракторов, а не целевых картинок

(взаимодействие «Тип задачи × Тип картинки», $p < 0{,}001$, см. также рисунок). С целевыми картинками синхронные переводчики справляются лучше, чем контрольная группа (39 vs. 30 % правильных ответов, хотя разница статистически не значима: $p = 0{,}23$), а с дистракторами хуже (66 vs. 76 % правильных ответов, $p = 0{,}02$). Кроме того, независимо от группы испытуемые делают больше ошибок в целевых картинках, чем в дистракторах ($p < 0{,}001$).

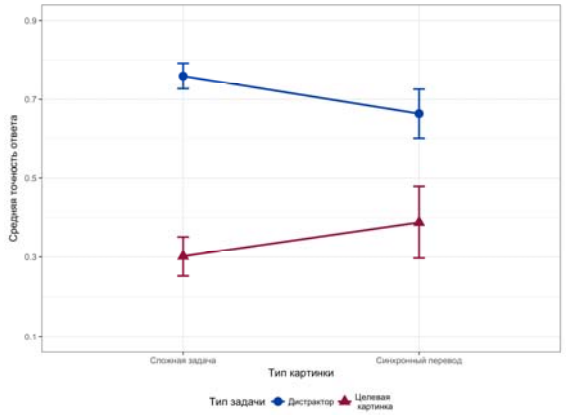


Рис. Точность выполнения теста на припоминание в зависимости от экспериментальной группы (типа задачи) и типа картинки

Обсуждение

Результаты эксперимента показали, что в ситуации когнитивной нагрузки поле внимания синхронных переводчиков отличается от поля внимания человека, не владеющего этим навыком. Общие характеристики движений взгляда при рассматривании сцены не меняются, о чем можно судить по средней длине фиксации, тогда как распределение внимания, о котором косвенно говорит доля распределения взгляда между фигурой диктора и фоном с иррелевантными объектами, позволяет утверждать, что синхронные переводчики меньше фиксируются на дикторе, что, вероятно, обуславливает восприятие большего количества поступающей визуальной информации.

Тест на припоминание также показывает отличие в обработке воспринятой информации разными группами испытуемых: контрольная группа в ситуации неопределенности склонна относить стимульную картинку к дистрактору (то есть считать, что такого объекта на видео не было). Это отражается в том, что у контрольной группы меньше ошибок в дистракторах и больше ошибок в целевых картинках, чем у синхронных переводчиков. Такую стратегию можно объяснить посредством теории распознавания сигнала в шуме [5]: критерий принятия решения под влиянием сильной когнитивной нагрузки сдвигается в сторону более консервативного решения (в нашем тесте дистракторов было в два раза больше, чем целевых картинок).

Что касается синхронных переводчиков, то результаты противоречат как теории распознавания сигнала в шуме (см. выше), так и ресурсной теории [4]. В соответствии с последней, переводчики в ситуации синхронного перевода сохраняют больше когнитивных ресурсов на координацию информации, чем другие люди при выполнении схожей с синхронным переводом по сложности и энергозатратности задачи. Наш эксперимент показал, что хотя в отношении целевых картинок ресурсная теория правомерна (больше ресурсов → лучше опознаются иррелевантные по отношению к основной задаче стимулы), тем не менее опознание дистракторов происходит в противоположном направлении (дистракторы опознают хуже, чем в контрольной группе). Таким образом, можно утверждать, что обработка информации у синхронных переводчиков во время их профессиональной деятельности происходит каким-то иным способом, чем в ситуации, сравнимой по когнитивной сложности и энергозатратности, выполняемой людьми, не владеющими этим навыком.

Авторы выражают благодарность магистранту Валерии Сухановой за помощь в сборе контрольной группы испытуемых.

Это исследование было поддержано грантом РФФИ № 16-06-00501_а.

Литература

1. *Morales J., Padilla F., Gómez-Ariza C.J., Bajo M.T.* Simultaneous interpretation selectively influences working memory and attentional networks // Acta Psychol. 2015. № 155. P. 82–91.

2. *Strobach T., Becker M., Schubert T., Kühn S.* Better dual-task processing in simultaneous interpreters // Frontiers in Psychology. 2015. V. 6. P. 1590.

3. *Treisman A.M.* Strategies and models of selective attention // Psychological Review. 1969. V. 76(3). P. 282–299.

4. *Kahneman D.* Attention and Effort. New Jersey : Prentice-Hall, INC. : Englewood Cliffs, 1973.

5. *Emelianova S.A., Gusev A.N.* Individual Differences in Auditory Signal Discrimination Task // The collection includes 3rd International scientific-practical conference «Innovations in science, technology and the integration of knowledge». Held by SCIEURO in London 23–28 February 2016. 2016.

6. *Chernigovskaya T.V., Parin S.B., Parina I.S., Konina A.A., Urikh D.K., Yachmonina Y.O., Chernova M.A., Polevaya S.A.* Simultaneous interpreting and stress: pilot experiment // Int. J. Psychophysiology. 2016. № 108. P. 165.

Формирование внутреннего плана действий: специфика ЭЭГ-данных в зависимости от когнитивных характеристик

О.А. Чувгунова

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург
Санкт-Петербургский государственный университет
chuvgunova@mail.ru

Умение выстраивать последовательность действий оптимальным способом во многом определяет успешность деятельности [1]. Психологические исследования свидетельствуют о взаимосвязи степени сформированности действий планирования и таких когнитивных характеристик, как общий уровень интеллекта, оперативная память, рефлексивность, поленезависимость, когнитивная гибкость [2, 3]. Однако данная зависимость установлена лишь на уровне деятельности на основании результатов психологического тестирования. Более глубокое понимание природы взаимосвязи стилевых особенностей и успешности планирования могло бы быть достигнуто с помощью ЭЭГ-методов, позволяющих получить данные о работе мозга непосредственно во время выстраивания последовательности действий.

Целью настоящего исследования является изучение специфики деятельности мозга в процессе формирования внутреннего плана действий в зависимости от стилевых характеристик испытуемых: рефлексивности / импульсивности, гибкости / ригидности когнитивного контроля, поленезависимости / полезависимости.

Выборку исследования составили студенты СПбГУ 1–2 курсов факультетов социологии, экономики, психологии (N = 41; M = 18,7; SD = 1,2; м. – 14; ж. – 27). Процедура эксперимента содержала получение информированного согласия, психологическую диагностику когнитивных стилей, проведение ЭЭГ-эксперимента.

Психодиагностический инструментарий включал методику словесно-цифровой интерференции Струпа, методику «Сравнение похожих изображений» Дж. Кагана, тест вложенных фигур Готшальда.

В ЭЭГ-исследовании применялся стимульный материал, разработанный на основе наглядно-образных и словесно-логических задач А.З. Зака для диагностики содержательного планирования [4, 5]. Протокол предъявления стимулов содержал 33 пробы с простыми комбинаторными задачами, 33 пробы со сложными комбинаторными задачами, 34 пробы с сюжетно-логическими задачами [4]. Пробы предъявлялись в рандомизированном порядке. Запись ЭЭГ осуществлялась с 21 активного отведения, электроды располагались по системе 10:20, стимулы предъявлялись в программе PsychoPy.

Согласно психодиагностическим данным, выборка характеризуется высокой рефлексивностью (M = 9,8; SD = 2,4) и поленезависимостью (M = 3,1; SD = 0,9). Среднее значение показателя ригидности / гибкости контроля по тесту Струпа 34,3 с, SD = 12,1. Соответственно были сформированы группы участников с высокими и низкими результатами по показателям когнитивных стилей.

Участки ЭЭГ, соответствующие выстраиванию последовательности действий, были очищены от артефактов и подвергнуты спектральному анализу (преобразование Фурье) с помощью программы WinEEG. ЭЭГ-данные участников с высокими и низкими результатами по диагностированным когнитивным стилям были усреднены. Затем было осуществлено сравнение следующих групп усредненных данных: 1) испытуемые с гибким контролем – испытуемые с ригидным контролем; 2) рефлексивные испытуемые – импульсивные испытуемые; 3) испытуемые с высокой поленезависимостью – полезависимые испытуемые.

Результаты спектрального анализа показали, что ЭЭГ-данные испытуемых с гибким когнитивным контролем характеризуются более высокой мощностью в тета-диапазоне и более низкой мощностью в альфа-диапазоне практически по всем фронтальным отведениям (особенно по фронтополярным отведениям, средней линии и в правом фронтальном отделе) по сравнению с ЭЭГ-данными участников с ригидным когнитивным контролем (рис. 1).

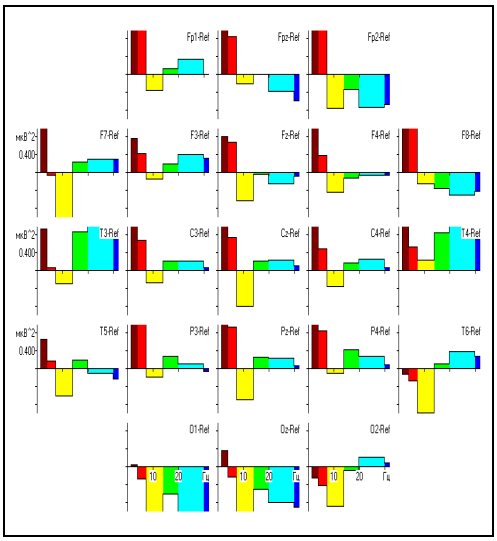


Рис. 1. Усредненные результаты спектрального анализа: разность между группами испытуемых с гибким контролем и с ригидным контролем

При этом успешность решения заданий была значимо выше у участников с гибким контролем (M = 64,7; SD = 12), чем с ригидным контролем (M = 48,4; SD = 11,2), $U_{эмп}$ = 13,5; $p \leq 0{,}01$.

Сходная, но менее выраженная картина отмечается и при анализе различий между результатами ЭЭГ-исследования участников с высокой и низкой рефлексивностью (рис. 2).

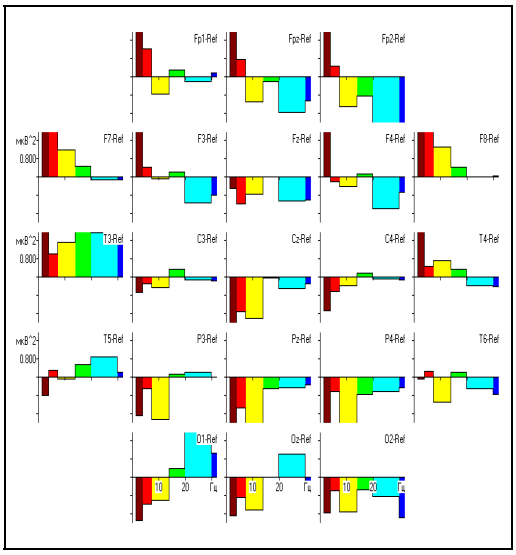


Рис. 2. Усредненные результаты спектрального анализа: разность между группами испытуемых с высокой рефлексивностью и с низкой рефлексивностью

При этом рефлексивные участники выполнили задания лучше, чем импульсивные (M = 58,5; SD = = 16; M = 50,3; SD = 7,2 соответственно), но это различие не является статистически значимым.

ЭЭГ-данные полезависимых участников характеризуются более низкой активностью прежде всего в тета-диапазоне, особенно в передних фронтальных отделах, по сравнению с полезависимыми участниками (рис. 3). При этом успешность решения заданий у участников с высокой полезависимостью была выше, чем у полезависимых испытуемых (M = 64,4; SD = 11,7; M = 51,9; SD = 11,8 соответственно), $U_{эмп}$ = 14,5; $p \leq 0{,}05$.

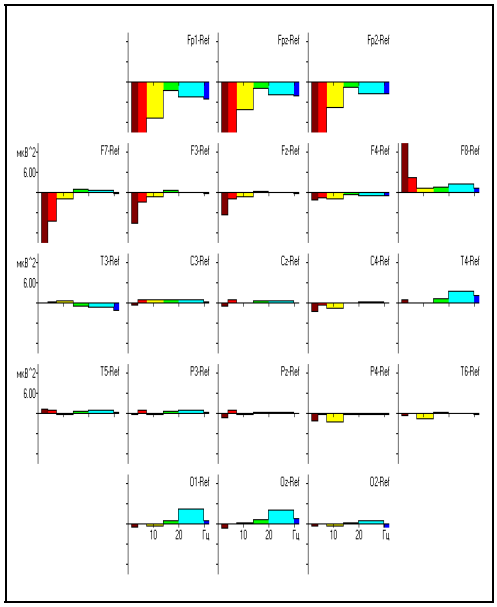


Рис. 3. Усредненные результаты спектрального анализа: разность между группами испытуемых с высокой полезависимостью и полезависимых испытуемых

Таким образом, испытуемые с высокой рефлексивностью, гибкостью когнитивного контроля, полезависимостью показали более высокие результаты в решении задач на формирование внутреннего плана действий, чем участники с импульсивным когнитивным стилем, ригидным когнитивным контролем, полезависимостью.

Однако в отношении ЭЭГ-данных результаты не столь однозначны. Согласно результатам спектрального анализа, у рефлексивных участников и участников с гибким когнитивным контролем активность в тета-диапазоне во фронтальных отделах мозга оказалась выше, чем у испытуемых с импульсивным когнитивным стилем и ригидным контролем.

Данный факт может объясняться большей нагрузкой на рабочую память, энергетические возможности мозга [6]. Высокая полезависимость, напротив, сопровождалась обратным эффектом – более низкой активностью в тета- и альфа-диапазоне во фронтальных отделах по сравнению с полезависимыми участниками. Таким образом, у испытуемых с высокой полезависимостью отмечалась меньшая нагрузка на рабочую память и энергетические ресурсы мозга по сравнению с полезависимыми участниками.

Можно предположить, что рефлексивные и когнитивно гибкие испытуемые решили задания лучше, задействовав ресурсы рабочей памяти более активно, чем импульсивные и ригидные участники. Полезависимые же участники выполняли задания с меньшей «ценой усилия», чем полезависимые участники. Возможно, благодаря высокой полезависимости испытуемые более четко и быстро осознавали условия задачи и варианты решения, что позволило им успешнее выполнить задание и затратить меньше когнитивных усилий и энергетических ресурсов по сравнению с полезависимыми участниками.

Публикация подготовлена в рамках поддержанного РФФИ научного проекта 15-36-01260.

Литература

1. *Чувгунова О.А.* Планирование как предмет психологического исследования // Психологические исследования. 2015. Т. 8. № 43. С. 11. URL: http://psystudy.ru (Дата обращения: 22.05.2017).

2. *Чувгунова О.А.* Учебные действия планирования у студентов: взаимосвязи с когнитивными характеристиками и профилем обучения в вузе // Педагогический журнал. 2016. № 4. С. 157–169.

3. *Diamond A.* Executive functions // Annual Review of Psychology. 2013. V. 64. P. 135–168.

4. *Чувгунова О.А.* Об опыте разработки стимульного материала для электроэнцефалографического исследования универсальных учебных действий планирования у студентов вуза // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 16, Психология. Педагогика. 2015. № 4. С. 174–186.

5. *Зак А.З.* Развитие и диагностика мышления подростков и старшеклассников. М. ; Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2010. 350 с.

6. *Кропотов Ю.Д.* Количественная ЭЭГ, когнитивные вызванные потенциалы мозга человека и нейротерапия. Донецк : Издатель Заславский А.Ю., 2010. 512 с.

Динамика функционального состояния человека при монологической речи

М.Е. Чугрова[1], А.В. Бахчина[2], С.Б. Парин[1,3], С.А. Полевая[1,3]

[1] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
[2] Институт психологии РАН, Москва
[3] НИИ прикладной и фундаментальной медицины Нижегородской государственной медицинской академии

Введение

Наша работа посвящена поиску взаимосвязи между особенностями функционального состояния и индивидуально-личностными характеристиками человека в ситуации межличностного взаимодействия в условиях монологической речи.

Межличностное взаимодействие рассматривается как случайный или преднамеренный, частный или публичный, длительный или короткий, вербальный или невербальный личный контакт двух и более людей, приводящий к взаимным изменениям их поведения, деятельности, отношений и установок [1].

Навык межличностного взаимодействия имеет огромное значение для благополучия и здорового функционирования организма. Ситуации, связанные с общением, неизбежно требуют вступления в социальные взаимодействия. Это может вызвать растущий интерес в исследовании биологических маркеров, связанных с навыком социального взаимодействия, с биологическими системами, лежащими в основе демонстрации социальной эффективности [2]. В современных социально-экономических условиях ведущими ценностями провозглашаются свобода, творчество и ответственность человека. В трудовых организациях, построенных на основе данных ценностей, работа должна доставлять сотрудникам удовольствие, и особую важность приобретают коммуникационные взаимодействия [3].

Существуют различные наблюдения и результаты исследований о влиянии присутствия других людей на трудоспособность [4], сердечный ритм [2, 5–7], принятие решений [4].

С момента описания механизма зеркальных нейронов [8] стали выдвигаться предположения о том, что именно они являются не только основой научения через подражание, но и нейронным механизмом, который управляет поведением в процессе социального взаимодействия в целом [9, 10].

Daniel S. Quintana с соавт. показали, что высокий уровень активации блуждающего нерва как компонента автономной нервной системы обеспечивает более точное понимание другого человека [11]. Shahrestani S. с соавт. выявили, что у здоровых участников наблюдается значимое снижение параметров вариабельности сердечного ритма (ВСР) во время решения отрицательных задач социального взаимодействия, но не во время нейтральных или положительных задач [2].

Отчасти проблема исследования механизма социального взаимодействия осложняется наличием большого спектра его видов со своими особыми характеристиками, дополнительными факторами, влияющими на участников взаимодействия. По количеству активных участников социальное взаимодействие можно разделить на монолог (1 активный участник), диалог (2 активных участника), полилог (3 и более активно взаимодействующих участников).

В предыдущих исследованиях, посвященных изучению влияния монолога в условиях публичного выступления на оратора, было показано, что при реализации подготовленной монологической речи в эмоционально напряженных условиях (в ситуации оценивания слушателями качества доклада) наблюдается динамика параметров вариабельности сердечного ритма, характерная для стресс-активации организма: резкое возрастание, а затем редукция общей мощности спектра вариабельности на фоне возрастания индекса вегетативного баланса [12, 13]. Также было показано, что фактор «личностная тревожность» оказывает влияние на функциональное состояние выступающего во время чтения на публике: у высокотревожных студентов общая мощность спектра вариабельности ниже, а индекс вегетативного баланса выше, чем у среднетревожных студентов [14].

Исследования, посвященные сравнительному анализу влияния монолога и диалога на функциональное состояние человека, показали следующее. Напряжение регуляторных систем у испытуемых значительно более развито при монологе (сниженные показатели мощности спектра ВСР и повышенный индекс вегетативного баланса). Контекст монолога вызывает общую регидизацию сердечного ритма (значимо более низкие значения RR-интервалов), что также свидетельствует о большем напряжении систем автономной регуляции кардиоритма относительно взаимодействия в условиях диалога. Таким образом, диалоговое взаимодействие на чужом языке оказывает меньшее возбуждающее воздействие на организм, чем взаимодействие на чужом языке в условиях монолога [15].

В своем исследовании мы уделяем внимание влиянию личностных особенностей человека. В частности, здесь рассматривается личностная характеристика «самоотношение» в контексте монологической речи (3 минуты) с отсутствием и присутствием аудитории слушателей.

Материалы и методы

Метод беспроводной электрокардиографии [16]. Запись сигнала производилась с помощью телеметрической системы BioHarness, которая представляет собой устройство регистрации кардиосигналов, вмонтированное в пояс. Измерение

производилось в процессе всех монологов без публики и перед аудиторией, а также до и после выступления. Для обработки данных использовались спектральные методы анализа вариабельности сердечного ритма – периодограммный метод, с помощью которого были получены параметры: суммарная мощность спектра вариабельности сердечного ритма – TP ($мс^2$), мощность спектра ритмограмм в области низких частот – LF ($мс^2$), мощность спектра ритмограмм в области низких частот – HF ($мс^2$), соотношение мощностей спектра ритмограмм в области низких и высоких частот (коэффициент вегетативного баланса) – LF/HF [12].

Психодиагностический метод. Целью психодиагностики было выявить особенности самооценки участников эксперимента. Для этого каждый участник перед началом мониторинга сердечного ритма заполнил опросник МИС (методика исследования самоотношения, автор С.Р. Пантилеев [17]). Самоотношение понимается автором методики как сложная, уровневая эмоционально-оценочная система, состоящая из открытости, самоуверенности, саморуководства, зеркального Я, самоценности, самопринятия, самопривязанности, конфликтности, самообвинения.

В качестве *статистических методов* обработки данных были использованы дисперсионный и корреляционный анализ.

Схема эксперимента состояла в следующем. Сначала каждый испытуемый проходил психодиагностический тест. Затем надевался датчик сердечного ритма и начиналась запись. Экспериментатор давал научный текст, испытуемый должен был его прочесть вслух, затем прочесть вслух перед студентами. Во второй экспериментальный день испытуемому необходимо было воспроизвести по памяти данный текст, сначала без публики, затем на публике (текст давался на дом, чтобы испытуемый смог подготовиться), в течение его рассказов также производился мониторинг сердечного ритма. Данная схема исследования была реализована на 16 студентах-добровольцах в возрасте 18–20 лет (т. е. проанализировано 64 записи ритмограмм). Содержание доклада и условия, в которых находился докладчик, были эмоционально нейтральными – данное выступление не получало никакой оценки, ни хорошей, ни плохой, о чем участники эксперимента знали заранее.

Результаты и обсуждение

Анализ динамик параметров вариабельности сердечного ритма в процессе монолога показал следующее.

Во время чтения вслух перед публикой в первый момент монолога (20–30 секунд) наблюдается значимо сниженный уровень значений RR-интервалов (рис. 1), то есть частота сердечных сокращений выше, что говорит о высокой энергозатратности периода начала монолога перед аудиторией слушателей.

Во время рассказа по памяти на публике наблюдается значимо сниженный уровень мощности спектра вариабельности ритма в диапазоне низких частот (LF) относительно рассказа без аудитории в течение первой минуты монолога, что отражает угнетение влияния симпатической нервной системы на сердечный ритм (рис. 2).

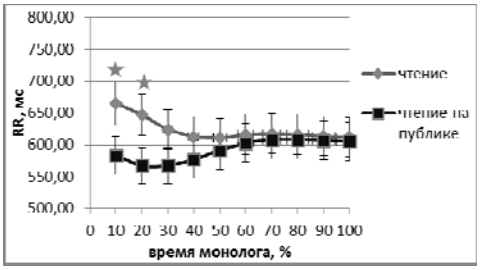


Рис. 1. Средняя динамика RR-интервалов кардиоритма выступающих при чтении текста и чтении перед слушателями (звездочкой отмечены значимые отличия, дисперсионный анализ методом повторных измерений)

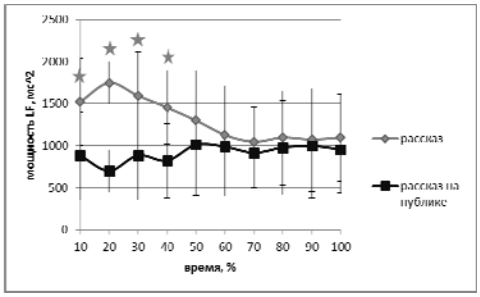


Рис. 2. Средняя по выборке динамика мощности спектра вариабельности в LF-диапазоне при рассказе по памяти текста и рассказе текста по памяти на публике («звездочкой» отмечены значимые отличия, дисперсионный анализ методом повторных измерений)

Можно говорить о том, что эффект публики здесь проявляется на этапе начала выступления и отражается на дезактивации механизмов возбуждения организма.

Таким образом, эффект публики при воспроизведении вслух текста отражается на функциональном состоянии ораторов в момент начала монолога. И то, читает ли выступающий с листа или воспроизводит по памяти, непосредственно контактируя глазами со слушателями, имеет значение. В первом случае возрастает потребность организма в дополнительной энергии, растет напряжение, что отражено в учащенном сердцебиении, во втором случае происходит временная дезактивация механизмов возбуждения организма.

Анализ индивидуальных различий функционального состояния испытуемых показал, что в контексте рассказа по памяти стрессовая динамика наблюдается у половины испытуемых (резкое возрастание, а затем редукция общей мощности спектра вариабельности на фоне возрастания индекса вегетативного баланса [12]).

При чтении вслух перед публикой и рассказе по памяти наблюдаются лишь единичные случаи стресс-активаций. Проанализировав связь наличия стресса во время публичной речи по памяти и особенностей самоотношения личности студентов, мы показали, что у студентов, у которых наблюдалась стресс-активация во время рассказа по памяти на публике, значимо ($p < 0,05$ по критерию

Манна – Уитни) более выражена такая черта самоотношения, как самообвинение (рис. 3). Индивиды с высоким уровнем самообвинения, по словам автора методики, склонны ставить себе в вину свои промахи и неудачи, собственные недостатки, направлять отрицательные эмоции в адрес «Я». Исходя из результатов нашего исследования, мы можем добавить, что такие люди более подвержены стрессу в условиях публичного выступления, даже если данное выступление будет безоценочным со стороны слушателей.

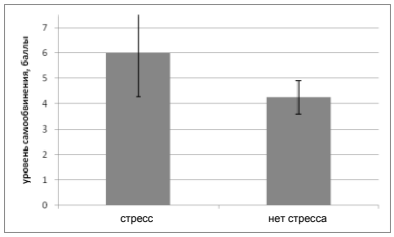


Рис. 3. Средний балл по шкале «Самообвинение» у студентов с наличием и отсутствием стресс-активации организма во время рассказа по памяти на публике

Были выявлены и другие взаимосвязи параметров функционального состояния при рассказе на публике и особенностей самоотношения. Так, показана значимая корреляция (0,53, критерий Спирмена) между средним значением мощности спектра вариабельности сердечного ритма в диапазоне низких частот (LF-компонент) и шкалы «Отраженное самоотношение». То есть у людей с большей выраженностью убеждения в положительном образе себя в глазах других наблюдается более высокий уровень активации симпатического отдела вегетативной нервной системы, отвечающего за общее возбуждение организма.

Таким образом, были найдены особенности самоотношения личности, связанные с проявлением стресса и с активацией симпатического отдела вегетативной нервной системы во время публичного монолога.

Заключение

В рамках данного исследования было рассмотрено влияние различных факторов на функциональное состояние человека в процессе монолога.

По итогам анализа полученных данных было выявлено следующее:

• влияние эффекта публики на функциональное состояние выступающего при воспроизведении вслух текста наблюдается в момент начала речи;

• условия монолога, такие как чтение с листа и воспроизведение по памяти, по-разному влияют на организм выступающего. В первом случае возрастает потребность организма в дополнительной энергии, растет напряжение, что отражено в учащенном сердцебиении относительно чтения без слушателей. Во втором случае происходит временная дезактивации симпатического отдела вегетативной нервной системы, отвечающего за общее возбуждение организма;

• черта самоотношения личности «самообвинение» связана с проявлением стресс-активации при рассказе по памяти на публике – стресс в этом контексте наблюдается у студентов с высоким уровнем данной черты;

• у людей с большей выраженностью черты «отраженное самоотношение» – убеждения в положительном образе себя в глазах других – в условиях публичного монолога по памяти наблюдается более высокий уровень активации симпатического отдела вегетативной нервной системы, отвечающего за общее возбуждение организма.

Литература

1. *Донцова, О.А.* Межличностное взаимодействие субъектов образовательного процесса в контексте формирования автономии подростков // Педагогическое образование в России. 2016. № 2. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/mezhlichnostnoe-vzaimodeystvie-subektov-obrazovatelnogo-protsessa-v-kontekste-formirovaniya-avtonomii-podrostkov. (Дата обращения: 04.04.2017).
2. *Shahrestani, S.* [*et al.*]. Heart rate variability during adolescent and adult social interactions : A meta-analysis // Biological Psychology. 2015. № 105. P. 43–50.
3. Организационная психология : учебник / под общ. ред. А.Б. Леоновой. М. : ИНФА-М, 2014. 429 с.
4. *Майерс, Д.Д.* Социальная психология. СПб. : Питер, 2010. 800 с.
5. *Allen, A.P.* [*et al.*]. Biological and psychological markers of stress in humans: Focus on the Trier Social Stress Test // Neuroscience and Biobehavioral Reviews. 2014. V. 38. P. 94–124.
6. *Lewinski, M.* [*et al.*]. Cortisol release, heart rate and heart rate variability in the horse and its rider: Different responses to training and performance // The Veterinary Journal. 2013. V. 197. P. 229–232.
7. *Данилова, Н.Н.* Психофизиология. М. : Аспект-Пресс, 2010. 350 с.
8. *Rizzolatti, G.* [*et al.*]. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action // Nature Reviews Neuroscience. 2001. V. 2. P. 661–670.
9. *Андреев, И.Л.* Зеркальные нейроны – физиологический фундамент общения и сознания // Психическое здоровье. 2013. Т. 11, № 10 (89). С. 75–83.
10. *Зайцева, Ю.С.* Зеркальные клетки и социальная когниция в норме и при шизофрении // Социальная и клиническая психиатрия. 2013. № 2. С. 96–105.
11. *Quintana, D.S.* [*et al.*]. Heart rate variability is associated with emotion recognition: Direct evidence for a relationship between the autonomic nervous system and social cognition // Int. J. Psychophysiology. 2012. № 86. P. 168–172.
12. *Бахчина, А.В.* [*и др.*]. Динамика ритма сердца в стрессогенных информационных контекстах // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2013 : тезисы докладов. Н. Новгород, 2013. С. 9–12.
13. *Королева, М.Е.* [*и др.*]. Влияние контекста публичного выступления на функциональное состояние человека // Бюллетень научных студенческих обществ Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. № 3. Гуманитарные и социальные науки. Н. Новгород : ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2013. С. 126–134.
14. *Королева, М.Е.* [*и др.*]. Особенности функционального состояния тревожных студентов, выступающих перед публикой // XIX Нижегор. сессия молодых ученых : гуманитарные науки : доклады. 2014. С. 90–91.
15. *Демарева, В.А.* [*и др.*]. Вегетативные корреляты субъективной сложности двух типов задач по иностранному языку // Вестник психофизиологии. 2014. № 4. С. 47–52.
16. *Полевая, С.А.* [*и др.*]. Телеметрические и информационные технологии в диагностике функционального состояния спортсменов // Клиническая медицина. 2012. Вып. 4. С. 94–98.
17. *Пантилеев, С.Р.* Методика исследования самоотношения. М. : Смысл, 1993. 32 с.

Революция глубокого обучения

С.А. Шумский

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
serge.shumsky@gmail.com

Около 10 лет назад усилиями нескольких рабочих групп под руководством G. Hinton, Y. Bengio и Y. LeCun были предложены методики обучения многослойных нейронных сетей и доказана их способность решать сложные задачи распознавания образов. Началась *революции глубокого обучения*, которая возродила интерес к нейронным сетям и превратила их в основной инструмент обновленного искусственного интеллекта, основанного на машинном обучении. В ходе этой революции появились надежные алгоритмы обучения сетей с сотнями слоев и миллиардами настроечных параметров, с использованием высокопараллельных GPU-ускорителей.

Уровень машинного интеллекта, основанного на глубоком обучении, радикально повысился. *Сенсорный интеллект* – машинное зрение и слух – уже вплотную приблизился к человеческому уровню. Машины научились не просто распознавать образы, но и *понимать их суть*, строить абстрактные модели объектов и их отношений. Их способность пересказывать смысл предложений своими словами лежит в основе современного машинного перевода. Они могут на естественном языке описывать сцены на картинках и фотографиях. И наоборот, порождать зрительные образы по их словесному описанию. То есть у машин появились зачатки *воображения* – способности генерировать образы внешнего мира по их внутреннему представлению. Машины сегодня могут обучаться разумному поведению, основанному на *ценностях* и нацеленному на достижение долгосрочных целей. Причем в некоторых областях (например, в играх) они демонстрируют сверхчеловеческие способности, которые к тому же быстро прогрессируют с дальнейшим ростом компьютерных мощностей.

Основное преимущество глубоких нейросетей – их способность порождать иерархии все более абстрактных представлений данных. Каждый следующий слой нейросети формирует все более и более абстрактные признаки входных данных как наиболее значимые комбинации признаков предыдущего уровня. Соответственно, чем больше слоев у нейросети, тем более абстрактными понятиями она может оперировать и тем более сложные задачи она может решать. Глубокое обучение представляет собой универсальную методику автоматического конструирования абстракций, продвинувшую искусственный интеллект сразу по многим направлениям. Сегодня и в машинном зрении, и в распознавании речи, и в машинной обработке текстов используются, по сути, одни и те же архитектуры глубоких нейросетей.

Революция глубокого обучения кардинально поменяла наши представления о машинном интеллекте. Раньше долгое время считалось, что интеллект можно запрограммировать, закодировав законы мышления и экспертные знания на том или ином формальном языке. Теперь мы понимаем, насколько нереалистичной была эта установка – настолько сложными оказались алгоритмы сенсорного интеллекта, содержащие подчас миллиарды параметров. Сегодня ставка делается на возникновение интеллекта в процессе обучения на больших массивах данных. Запрограммировать требуется уже не сам интеллект, а лишь способность машин к обучению, что гораздо проще. Машинное обучение становится синонимом машинного интеллекта.

Успехи глубокого обучения открывают широкие возможности для большого числа практических применений – от общения с интеллектуальными агентами на естественном языке до автономных автомобилей, дронов и роботов. Мир роботов и машинного интеллекта внезапно переместился из абстрактного отдаленного будущего в завтрашний и даже сегодняшний день. Как следствие – волна общественного интереса к машинному обучению, бум инвестиций, резкое увеличение интенсивности исследований и разработок, сопровождающиеся дальнейшими успехами. Вместе с тем растут опасения, что начинается надувание очередного «пузыря» и ожидания адептов искусственного интеллекта, как это уже не раз случалось в прошлом, существенно завышены. В предлагаемом обзоре мы рассмотрим предпосылки происходящей революции, опишем ее основные достижения и соответствующие технологии, а также оценим перспективы ее дальнейшего развития.

Природные, теоретические основы структур нуклеотидов, грамматик и генов живых систем

М.Я. Эйнгорин

НИИ ОКП «СКИТ», Нижний Новгород
skit@vmk.unn.ru

После открытия двойной спирали [1] началось активное использование математических методов для описания структур живого математиками весьма высокого уровня. К указанным работам можно отнести, например, труды [2, 3, 4].

Цикл работ автора с 1999 года первоначально был полностью основан на знании четкой взаимосвязи кодонов и аминокислот, таблиц их соответствия для разных диалектов живого. Настоящий доклад является развитием работ автора в указанном направлении по 2016 год.

В докладе показано, что живая природа создана искусственно на базе тесной взаимосвязи дисциплин математики, включая логику и основы математической симметрии, химии, физики и идеологии, существовавших до создания генов, не менее чем многие миллиарды лет назад.

В докладе будут изложены отдельные аспекты математики генов для описания их структур. В результате указанного подхода удалось показать принципы формирования и существование ранее неизвестных соотношений параметров нуклеотидов и их групп. Дано математическое обоснование спирали ДНК. Показано существование грамматических структур синтеза генов, в том числе для синтеза мРНК и ДНК, показана информационная многослойность генов [5], принципы возможных преобразований, вариаций в связи с разнообразием диалектов организмов, поиска повреждений и восстановления генов [6, 7]. Показаны соотношения параметров нуклеотидов и их масс и существование минимального кванта массы всех генетических построений. Все построения связаны с симметрией, широким понятием инверсий, позиционной логикой, комбинаторной математикой и свойствами малых позиционных кодов.

Показана возможность существования волновых процессов и синхронизации генов. Показано, что упаковка генов тесно связана с их информационной многослойностью.

Показано, что вся живая и неживая материя обязана своим существованием «вечным двигателям» в виде атомов таблицы Д.И. Менделеева. Природа использовала «вечные двигатели» атомов для синтеза всего многообразия неживой и живой материи. Обсуждаются вопросы и варианты построения постоянной и оперативной памяти на базе нуклеотидов.

Результаты работ говорят о том, что живая природа Земли по крайней мере вторично создана, а все наше экологическое поведение должно вписываться в единую природную концепцию жизни на планете Земля.

Результаты исследований изложены в монографии [7], которая может служить учебником для комплексных специальностей университетов по направлению «Синтез живых систем».

Литература

1. *Watson J.D., Crick F.H.* A structure for deoxyribose nucleic acid // Nature. 1953. V. 171. P. 737–738.

2. Математические проблемы в биологии // Сб. / под ред. Р. Беллмана. 1966.

3. *Свижерев Ю.М., Пасеков В.П.* Основы математической генетики. М. : Наука, 1982. 511 с.

4. *Ратнер В.А.* Генетический код как система // Соросовский образовательный журнал. 2000. № 3.

5. *Эйнгорин М.Я.* Основы кодирования и управления в молекулярной биологии. Н. Новгород, 2001. 116 с. ISBN 5-7032-0390-2.

6. *Эйнгорин М.Я.* Математика и модели грамматик генетических структур живых систем. Н. Новгород, 2014. 524 с. ISBN 978-5-990-4043-1-1.

7. *Эйнгорин М.Я.* Основы синтеза структур нуклеотидов, грамматик и генов живых систем. Н. Новгород, 2017. 176 с. ISBN 978-5-990-4043-2-8.

Достижения и проблемы в использовании «концептуальных моделей мозга»

В.Г. Яхно

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
yakhno@appl.sci-nnov.ru

1. Современное использование концептуальных моделей

Для понимания процессов управления живыми системами, в частности функциональными механизмами работы мозга, используются концептуальные (смысловые, базовые) модели. Концептуальная (содержательная) модель – это абстрактная модель, определяющая структуру моделируемой системы, свойства ее элементов и причинно-следственные связи, присущие системе и существенные для достижения цели моделирования [1]. В этой же статье приведен ряд дополнительно-уточняющих определений [2–6]. Разработка симулятора живых систем и понимание их функционирования подразумевает наличие таких моделей.

Выделим следующие экспериментальные закономерности, которые необходимо учитывать при адекватном моделировании живых систем.

1.1. Все субъекты в Природе взаимосвязаны, поэтому формируемые редуцированные модели должны учитывать эти возможности (см., например, [7–10, 21–32]).

1.2. Субъективная реальность живой системы связана с возможностью создания внутренней интерпретации распознающей системой входного сигнала и использованием этой интерпретации для оптимизации текущего состояния на основе прошлого опыта, а также в планировании будущих действий (см., например, [11–13, 18, 19, 33–39]).

1.3. Существует иерархия обработки внешних сигналов, образов, планируемых действий, процессов управления при их реализации (см., например, [14–19]).

1.4. Оценка правильности получаемых модельных результатов соответствующим режимам поведения реальных природных объектов проводится с использованием как минимум одного из двух методических подходов: а) естественного для живых систем правила «Практика – критерий истины»; а также б) принятой на сегодня научной парадигмы «Повторяющаяся практика для любого желающего проверить результаты – критерий истины» [7, 21, 22]. Физические или математические модели используются при этом в качестве языка описания и согласования результатов между исследователями. Экспериментальные данные, которые не удовлетворяют такому методическому подходу, обычно игнорируются и уводятся из научного рассмотрения. Таким образом, субъективное восприятие исследователя и построенное на нем изложение выносится за пределы существующего ныне научного подхода.

Таким образом, опора только на один из известных методологических подходов создает барьеры в изучении механизмов функционирования живых систем.

Цель данной работы заключается в тезисной демонстрации возможностей уже предложенных к настоящему времени концептуальных (функциональных) моделей для описания известных экспериментальных данных о поведении живых систем на основе существующих научных парадигм.

Модельные расчеты позволяют осуществлять «повторяющуюся практику для любого желающего проверить результаты», а формализованные схемы возможной архитектуры исследуемой живой системы, полученные в том числе и на основе субъективных источников, позволяют проводить сопоставление с практикой, проверять гипотезы и проводить корректировку моделей. Важно отметить, что данные, обосновывающие корректировку, обычно берутся из областей, находящихся за пределами результатов модельного описания.

2. Достижения и проблемы

Известные к настоящему времени концептуальные модели можно рассматривать, например, в виде 4 групп, описывающих функциональные операции, известные для живых систем.

2.1. Быстрые автоматические процессы выделения или подавления тех сигналов, на которых система была обучена ранее. Это соответствует бессознательным режимам преобразования сенсорных сигналов. Используемые ныне модели для распределенных неравновесных сред позволили изучить разнообразные динамические структуры коллективной активности. Важно, что результаты пространственно-временных режимов преобразования входных сенсорных сигналов наглядно демонстрируют возможные механизмы выполнения тех или иных функциональных операций в живых системах.

Однако существует проблема дальнейшей модификации такого рода моделей и изучения режимов их функционирования, чтобы параметры моделей и структуры значений переменных имели возможность для сравнения с результатами экспериментов с реальными живыми системами.

2.2. Предложенные ныне схемы архитектур для «элементарных когнитивных систем» позволяют рассмотреть различные режимы бессознательного восприятия, а также пропуска сигнала (когнитивные фильтры) [11–13, 18, 19, 33–39]. Они позволяют ввести определения режимов осознанной обработки, оптимизирующей настройки системы для выполнения заданных операций. Позволяют рассмотреть варианты процедур планирования будущих состояний системы, продемонстри-

ровать режимы собственного целеполагания. Возможно выделение таких архитектурных связей в системе, которые аналогичны процессам интуитивного восприятия информации. Сейчас эта работа выполняется в основном с помощью программных моделей. При этом выбор используемых экспериментальных данных осуществляется на основе субъективного опыта разработчика.

В то же время существует проблема дальнейшей модификации такого рода схемных моделей и изучение режимов их функционирования, чтобы в «базовых когнитивных системах» можно было учитывать качественные взаимовлияния переменных от модульных блоков, ориентированных на обработку информационных сигналов (когнитивные циклы); обработку эмоциональных сигналов (эмоциональные циклы); управление исполнительными механизмами (моторные циклы); обеспечение энергетических ресурсов и восстановительных операций (вегетативные циклы) [17–19].

Важно отметить также, что подобные системы могут быть реализованы на основе элементов, состоящих из физических неравновесных сред различной природы.

2.3. Иерархические модели используются для более реалистичного описания известных экспериментальных данных. С их помощью можно описывать многоуровневые режимы обработки входных сигналов. В таких моделях удается отобразить широкий спектр «профессионально-адекватных» реакций живой системы.

На основе экспериментальных данных предложены схемы управления со стороны высших уровней, в том числе и для так называемых модулей «Эго», «Я» или «Самость» [8, 17–19, 23]. В ряде экспериментов по регистрации субъективных описаний людей обращается внимание на одновременное функционирование как минимум двух видов «Я» или «Самости»: одно оптимизирует запланированные действия тела; другое наблюдает и оценивает происходящие события как бы со стороны [23].

Иерархические модели позволяют конструировать описание практически любых видов восприятия внешних сигналов и соответствующего поведения живых систем. Так, выделены режимы, специализированные по типу обрабатываемой информации, например: а) «одномоментное» принятие решений по ассоциациям (обычно проводят аналогию с работой правого мозга) и б) поэтапное логическое принятие решений с множественными промежуточными результатами (обычно проводят аналогию с работой левого мозга).

Показано также, что при общении двух живых систем (с учетом влияния их эгрегоров) возможна реализация до 16129 разнообразных видов информационных потоков (число состояний взаимодействующих систем) [21].

Дальнейшее развитие иерархических моделей сталкивается с необходимостью рассмотрения проблем научного описания при подготовке ответов, например, на следующие вопросы:

«На какой физической основе реализуется эгрегор и его взаимодействие с каждой из живых систем, его создавших?»

«С какими физическими процессами ассоциируется субъективное «верование» в существование какого-либо понятия и проявление такого «верования» в разнообразных видах «религиозного поведения» живых систем? Какую роль при этом играет вовлеченность живой системы в тот или иной социальный процесс?»

«Какие виды социальных процессов может продуцировать коллективная динамика живых систем? Какую роль играют нравственность и этические правила в выборе той или иной алгоритмики действий модельных когнитивных систем?»

«Как скоро будут разработаны модельные иерархические когнитивные системы, с помощью которых можно получить конкретные примеры взаимодействия двух систем с различным объемом знаний и данных, которыми они обладают?» Такие примеры необходимы для обсуждения процессов формирования рационального или иррационального восприятия и последующих действий на их основе.

2.4. Иерархические модели используются также для описания процедур преодоления противоречий в данных, знаниях, принятых решениях и т. п. когнитивными системами, которые запускаются условиями разного вида «диссонансов» – ошибками между реальными и ожидаемыми сигналами. В результате происходит перестройка архитектуры когнитивной системы. Такие модели ориентированы на описание процедур трансформации, развития иерархии «Самостей» с различными уровнями отражения и понимания природных процессов в развивающейся интегральной когнитивной системе [8, 17–20].

Эта группа моделей, с моей точки зрения, менее всего развита. Однако существует множество субъективных описаний людей в различных психофизических исследованиях [7–10, 21–32], которые могут быть использованы для разработки моделей развития иерархии «Самостей» – управляющего центра в интегральной когнитивной системе. Последующее сопоставление результатов модельных расчетов с данными экспериментов позволит перевести существующие субъективные описания в разряд научных представлений.

2.5. Известные режимы функционирования упомянутых 4 групп моделей сводятся в единую суммарную таблицу, в которой на основе экспериментальных данных и теоретических описаний процессов обработки информационных сигналов людьми можно выделить как минимум три вида особенностей восприятия живых систем и основанных на них действиях:

а) **образное, «интуитивно-чувственное» восприятие** (см., например, [7–10, 21–32]), ориентированное на «внутренний мир» людей;

б) **формализованно-модельное, инженерное восприятие** (см., например, [11–19, 33–39]), ори-

ентированное на создание «искусственной реальности»;

в) **«текстуально-книжное» восприятие, основанное на логических цепочках ассоциативных образов** (см., например, [2–17, 20–22]), представляющее комбинации предыдущих двух видов восприятия в различных пропорциях и ориентированное на «социальные взаимоотношения» между людьми.

Существующие концептуальные модели уже сейчас позволяют предлагать варианты формализованных объяснений известных режимов функционирования живых систем. При использовании результатов работ [7–13, 17–32] формализованно-концептуальному описанию становятся доступны и так называемые «загадочные» процессы в механизмах управления живыми системами. Однако, как следует из рассмотренных моделей, огромное разнообразие возможных состояний при взаимодействии людей приводит к режимам непонимания между ними. В результате нарушается совместная деятельность исследователей. Практический опыт взаимодействия заинтересованных людей позволяет преодолевать такие противоречия, если используется адекватный методологический подход (раздел 1.4), который необходим исследователю в конкретной жизненной ситуации, и обычно он осуществляет правильный выбор на основе своего внутреннего чувства различения.

3. Области приоритетов в развитии концептуальных моделей

Предположим, что все планируемые сейчас разработки уже выполнены. Как изменятся наши мотивации, выбор областей исследований, как это скажется на дальнейшем поведении разработчиков?

Развитие существующих концептуальных моделей позволит преодолевать сформулированные выше проблемы и представить их решения, например, в следующих приоритетных направлениях.

3.1. Важную роль играет сейчас формирование образовательных систем, ориентированных на эффективное использование накопленных знаний в различных профессиональных областях, и адекватное решение встречающихся там проблем. Есть надежда, что это будет направлено на увеличение доли творческих исследователей в нашем обществе по сравнению с людьми-потребителями. Эта прикладная область ориентирована, в первую очередь, на развитие «внутреннего мира» людей, становление у них человеческого типа строя психики, расширение их собственных возможностей [7, 21, 22]. Достижения в этой области могут также гармонизировать социальные взаимоотношения между людьми.

3.2. Технические системы, умеющие выполнять целевые задания в реальной природной обстановке, адекватно изменять приоритетность своих действий (на основе прошлого опыта) для достижения поставленной цели, способные к самообучению или умеющие общаться с коллективом разработчиков. Эта область исследований ориентирована на создание искусственной реальности. Результаты именно из этой области предлагаются сейчас как примеры основных достижений научного подхода.

3.3. Формирование базы данных наглядных образов и примеров динамических процессов в социальных системах позволит формировать адекватные концептуальные модели для тех или иных жизненных ситуаций. Это особенно важно в связи с переходом к более справедливому общественному устройству, с поиском методов разрешения конфликтов на этапе перехода общественных систем от толпо-«элитарного» устройства к режимам гармоничного самоуправления, соборного общежития [7, 21, 22].

Развитие этих и других направлений исследований приведет к накоплению такого объема результатов, адекватно описывающих механизмы функционирования живых систем, когда область «когнитивные исследования» может стать разделом физической научной дисциплины. Важно понимать, что многие проблемы и противоречия в исследовании живых систем могут быть разрешены, если в зависимости от жизненных обстоятельств будут использоваться оба исследовательских подхода: а) естественное для живых систем правило «Практика – критерий истины»; б) принятая на сегодня научная парадигма «Повторяющаяся практика для любого желающего проверить результаты – критерий истины».

Литература

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Концептуальная_модель.

2. *Welford A.T.* On the human demands of automation: Mental work conceptual model, satisfaction and training // Industrial and business psychology. 1961. V. 5. P. 182−193.

3. Эргономика. Принципы и рекомендации / под ред. В.П. Зинченко. М. : ВНИИТЭ, 1970. 246 с.

4. *Крылов А.А.* Организация информационного управляющего процесса в системе мозга // Методология исследований по инженерной психологии и психологии труда. В 2 ч. Ч. 2 / под ред. А.А. Крылова. Л. : Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1975. С. 3–39.

5. *Галактионов А.И.* Основы инженерно-психологического проектирования АСУТП. М. : Энергия, 1978. 208 с.

6. *Суходольский Г.В.* Основы психологической теории деятельности. 2-е изд. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 168 с.

7. ВП СССР. Основы социологии. СПб., 2010. URL: http://kob.su/kobbooks/osnovy-sotsiologii.

8. *Уилбер К.* Интегральная психология: Сознание, Дух, Психология, Терапия. М. : АСТ, 2004. 412 с.

9. *Гроф С.* Психология будущего. Уроки современных исследований сознания / пер. с англ. С. Офертаса ; науч. ред. В. Майков. М. : АСТ, 2001.

10. *Гроф С.* Космическая игра: Исследование рубежей человеческого сознания / пер. с англ. О. Цветковой. М. : АСТ, 2004. 248 с.

11. *Сергин В.Я.* Психофизиологические механизмы осознания: гипотеза самоотождествления // Журнал высшей нервной деятельности. 1998. Т. 48, вып. 3. С. 558–570.

12. *Иваницкий А.М.* Мозговые механизмы оценки сигналов. М., 1976.

13. *Yakhno V.G.* Basic models of hierarchy neuron-like systems and ways to analyse some of their complex reactions // Optical Memory & Neural Network. 1995. V. 4, № 2. P. 141–155.

14. *Meunier D., Lambiotte R., Bullmore E.T.* Modular and hierarchically modular organization of brain networks // Frontiers in Neuroscience. 2010. V. 4, № DEC.

15. *Gerstner W.* [*et al.*] Neuronal dynamics: From single neurons to networks and models of cognition. Cambridge University Press, 2014.

16. *Markram H.* [*et al.*] Reconstruction and Simulation of Neocortical Microcircuitry // Cell. 2015. V. 163, № 2. P. 456–492.

17. *Шмидт Р., Тевс Г.* Физиология человека. В 3 т. М. : Здоровье и медицина, 1996.

18. *Яхно В.Г., Полевая С.А., Парин С.Б.* Базовая архитектура системы, описывающей нейробиологические механизмы осознания сенсорных сигналов // Когнитивные исследования : сборник научных трудов. Вып. 4 / под ред. Ю.И. Александрова, В.Д. Соловьева. М. : Институт психологии РАН, 2010. С. 273–301.

19. *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. Гл. 6. С. 169–202. (Синергетика от прошлого к будущему ; № 70 ; Науки об искусственном ; № 13).

20. *Парин С.Б.* Роль эндогенной опиоидной системы в формировании экстремальных состояний : дис. ... докт. биол. наук. М., 2011. 491 с.

21. ВП СССР. От корпоративности под покровом идей к соборности в Богодержавии. URL: http://medznate.ru/docs/index-53642.html.

22. ВП СССР. Об имитационно-провокационной деятельности. СПб., 2001. URL: http://dotu.ru/files/20010324_Imitac_prov.pdf.

23. *Мольц М.* Я – это Я, или Как стать счастливым : пер. с англ. / предисловие В.П. Зинченко, Е.Б. Моргунова. М. : Прогресс, 1991. 192 с.

24. *Пиаже Ж.* Психология интеллекта. 1942 ; 1948 ; http://fanread.ru/book/4343688/.

25. Тибетская йога и тайные учения, или Семь книг о мудрости великого пути. М. : ФАИР-ПРЕСС, 2001. 480 с.

26. *Багван Шри Ражниш* (*Ошо*). Психология эзотерического. М. : Нирвана, 2004. 160 с.

27. *Маслоу А.* Мотивация и личность. 3-е изд. / пер. с англ. СПб. : Питер, 2008. 352 с.

28. *Свияш А.* Проект «Человечество»: успех или неудача? Размышления о людях и их странном поведении. М. : АСТ : Астрель, 2006. 286 с.

29. *Уилсон Р.А.* Прометей восставший. Психология эволюции / пер. с англ. ; под ред. Я. Невструева. К. : ЯНУС, 1999. 304 с. ; http://www.yugzone.ru/uilson.htm.

30. *Ньютон М.* Путешествия души. Изучение жизни после жизни / пер. с англ. СПб. : Будущее Земли, 2017. 328 с.

31. *Ньютон М.* Предназначение души. Жизнь между жизнями / пер. с англ. К.Р. Айрапетян. СПб. : Будущее Земли, 2016. 384 с.

32. *Уолш Н.Д.* Беседы с Богом : Необычный диалог : трилогия / пер. с англ. К.Р. Айрапетян. М. : София, 2016. 624 с.

33. *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.

34. *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.

35. *Станкевич Л.А.* Искусственные когнитивные системы // Научная сессия МИФИ-2010. XII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2010» : лекции по нейроинформатике. М. : НИЯУ МИФИ, 2011. С. 106–160.

36. *Станкевич Л.А.* Когнитивные системы зрительного восприятия // Научная сессия МИФИ-2013. XV Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2013» : лекции по нейроинформатике. М. : НИЯУ МИФИ, 2013. С. 14–71.

37. *Шумский С.А.* Реинжиниринг 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.

38. *Жданов А.А.* Автономный искусственный интеллект. М. : Бином : Лаборатория знаний, 2008. 359 с.

39. *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.

Авторский указатель

А

Аверкина Л.А. 9
Айдаркин Е.К. 164
Александров И.О. 135
Александров Ю.И. 12, 206, 208
Александрова Н.Ш. 15
Алексеев А.К. 18
Алексеева С.В. 242
Алиев Н.Ш. 55
Андреев А.В. 21
Антонец В.А. 25, 28
Аринкин Н.А. 126
Аскарова Д.В. 222

Б

Бажанова М.В. 31
Баженова А.Е. 33
Бак М.В. 183
Балашова К.И. 31
Бахчина А.В. 36, 208, 246
Бахшиев А.В. 38
Беллюстин Н.С. 45
Белощенко Д.В. 48
Бендерская Е.Н. 51
Берестин Д.К. 55, 71
Бикмухаметова Л.М. 188
Блинова Т.В. 148
Бовырина А.А. 57
Бондарь А.Т. 60, 219
Борисенок С.В. 139
Борисов В.И. 195
Бронфельд Г.Б. 63
Булатов И.Б. 94

В

Витяев Е.Е. 67
Воловик М.Г. 172
Вохмина Ю.В. 71

Г

Гавриленко Т.В. 80
Гаврилов В.В. 74
Гай В.Е. 77, 141
Галкин В.А. 80, 97
Гимадиев Б.Р. 33
Голубев А.М. 90
Горбунов Д.В. 94
Горбунов С.В. 71
Гордлеева С.Ю. 83, 190
Григорьев Н.А. 83, 190
Григорьева С.В. 222
Гринченко Ю.В. 206
Грубов В.В. 21, 203
Гунделах Ф.В. 38

Д

Девицын И.Н. 80
Демарева В.А. 86
Дербасов М.О. 77
Дерюгин А.А. 212
Дмитриев А.В. 141
Дорошева Е.А. 90

Е

Егоров И.В. 198
Еритенко Н.А. 229
Еськов В.В. 94, 97
Еськов В.М. 80, 97

Ж

Журавлев М.О. 101, 103, 105, 198

З

Заварнова Ю.А. 135
Зайдельман Л.Я. 126
Запара Т.А. 179, 185
Зинина А.А. 126

И

Иваницкий Г.А. 108
Илюйкина И.В. 33, 48
Иржанова Д.Т. 55

К

Казанцев В.Б. 31, 83
Камратов С.В. 113
Каплан А.Я. 83, 190
Клюс Л.Г. 71, 94
Кнабенгоф М.А. 167, 242
Коломбет В.А. 116
Колосов А.В. 119
Колосова А.И. 222
Конина А.А. 167, 242
Короновский А.А. 101, 103, 203
Корсакова-Крейн М.Н. 122
Котов А.А. 126
Крылов А.К. 128
Курманов И.Г. 132

Л

Лобов С.А. 31
Логинова И.А. 183
Лосик Г.В. 212
Лукоянов М.В. 83, 190

М

Майстренко В.И. 132
Майстренко Е.В. 132
Макаров В.А. 31
Макаров В.В. 21
Максимова Н.Е. 135
Маркелова К.А. 183
Меклер А.А. 139
Мигунова Н.В. 122
Милов В.Р. 141
Минина Е.Н. 144
Михайлов В.В. 38
Москаленко О.И. 101, 103

Н

Некрасова М.М. 148
Непомнящих В.А. 151
Никонов Ю.В. 154
Нуйдель И.В. 119, 157

О

Ольшанский В.М. 160

П

Павловская М.А. 164
Парин С.Б. 148, 167, 246
Парина И.С. 36, 167
Пахомов А.М. 170
Перепелкина О.В. 210
Пимашкин А.С. 83
Писарчик А.Н. 21
Полевая А.В. 113
Полевая С.А. 113, 122, 148, 167, 172, 219, 246
Полетаева И.И. 210
Полякова П.Д. 86
Продиус П.А. 176
Проскура А.Л. 179, 185
Протасов П.А. 105

Р

Радаева Т.М. 183, 195
Ратушняк А.С. 179, 185
Редько В.Г. 151
Рожило Я.А. 238
Руннова А.Е. 21, 105
Русак С.Н. 188

С

Савельев В.Ю. 45
Савосенков А.В. 83, 190
Савчук Л.В. 219
Сварник О.Е. 192
Свиридов В.С. 135
Сельский А.О. 198
Семерикова Ю.И. 183
Сизов А.Ю. 201
Симонов А.Ю. 31
Ситникова Е.Ю. 203
Созинов А.А. 206
Созинова И.М. 208
Соколов М.Е. 157
Сорокоумов Е.Д. 185
Станкевич Л.А. 38
Степанова Е.Ю. 195

Т

Тарасова А.Ю. 210
Таротин И.В. 108
Тельных А.А. 45, 57
Ткаченко В.В. 212
Трусов М.В. 33, 48

Трушина И.А. 183
Тюриков М.И. 201

У
Умнов А.Л. 215
Утробин В.А. 217

Ф
Фатеев М.К. 212
Федосова Л.О. 201
Федотова И.В. 148
Федотчев А.И. 219
Филатов М.А. 222
Филатова Д.Ю. 222
Филатова О.Е. 97, 188

Х
Харитонов А.А. 28
Хижняк Е.П. 172
Храмов А.Е. 101, 103, 198, 203

Ц
Цукерман В.Д. 226, 229

Ч
Чеберева О.Н. 233
Чернавская О.Д. 238
Чернавский Д.С. 238
Черниговская Т.В. 167, 242
Чувгунова О.А. 244
Чугрова М.Е. 246

Ш
Шейдер А.Д. 55
Шемагина О.В. 170
Шубина Л.В. 60
Шумский С.А. 249

Щ
Щипицин К.П. 48

Э
Эйнгорин М.Я. 250

Я
Яхно В.Г. 251

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2017

ТРУДЫ V ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Редактор *И.А. Кокорина*
Верстка *М.В. Башевой*, *А.А. Ереминой*
Корректор *Д.П. Семенова*
Обложка *С.В. Кротовой*

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 32. Уч.-изд. л. 28,5.
Тираж 150 экз. Заказ № 81(2017).

Отпечатано на ризографе в типографии Института прикладной физики РАН.
603950, Н. Новгород, ул. Ульянова, 46