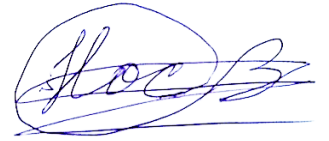


На правах рукописи



Носовец Захар Андреевич

**МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ НЕЙРОСЕМАНТИЧЕСКИХ КАРТ
ГОЛОВНОГО МОЗГА ЧЕЛОВЕКА**

5.12.4. – Когнитивное моделирование (физико-математические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

Научный руководитель: **Ушаков Вадим Леонидович**
кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института перспективных исследований мозга Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

Официальные оппоненты: **Казанцев Виктор Борисович**
доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой нейротехнологий Института биологии и биомедицины Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского

Штарк Маркс Борисович
доктор биологических наук, профессор, академик РАН, руководитель научного направления Федерального исследовательского центра фундаментальной и трансляционной медицины

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Защита диссертации состоится 10 октября 2024 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.340.15 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корпус 2, Зал научных демонстраций.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского» и на сайте ННГУ: <https://diss.unn.ru/files/2024/1461/diss-Nosovets-1461.pdf>

Автореферат разослан _____ 2024 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор социологических наук

Петрова Ирина Эдуардовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Субъективный опыт человека представляет собой важнейший объект исследований в психологии и когнитивной науке. Язык – вторая сигнальная система в головном мозге, которая формирует понятия на основе классификации множеств признаков наблюдаемых предметов и явлений [1]. В этом состоит её отличие от первой сигнальной системы, отвечающей на раздражители чувственного восприятия. Способность лексически обобщать сигналы первой сигнальной системы, то есть формировать понятия на основе классификации множеств признаков наблюдаемых предметов и явлений, является основой абстрактного мышления. При когнитивной нагрузке, связанной с протеканием процессов сознания, человек оперирует не просто знаками в виде слов, а означаемыми ими понятиями, которые на основе дальнейшего процесса абстрагирования и обобщения, организуются в семантические категории. Отсюда следует, что задача выяснения нейросетевой репрезентации семантических категорий, к которым подсознательно обращается вторая сигнальная система, является актуальной.

Нейросемантическая парадигма — это актуальный подход в области когнитивной науки, направленный на решение психофизиологической проблемы в части изучения локализации механизмов понимания смысла текста. Большинство существующих исследований локализации нейросемантических категорий в головном мозге человека основано на предъявлении простого стимульного материала, например, отдельных существительных. Из-за такой изолированной семантической парадигмы результаты таких исследований не отвечают на вопрос, насколько подлинно они отражают обработку языка в его повседневном, комплексном использовании и, в частности, как семантическая информация распределяется по всей системе областей серого вещества в условиях восприятия речи, максимально приближенных к естественным. Такие исследования также не задают контекст слова, точно определяющий его смысл (например, слово «ключ» в зависимости от контекста может иметь разные значения: инструмент, родник, средство разгадки, и т. д.). Также, в исследованиях, связанных с предъявлением текста, важно контролировать временные пределы предъявления каждого слова, что наиболее легко сделать в аудиальной модальности предъявления стимулов. К тому же, лингвисты рассматривают аудиальную модальность как первичную.

Наиболее перспективное направление [2, 3] связано с комплексным картированием отклика системы интегрированных нейросетей головного мозга на семантические стимулы, с использованием в качестве аудиостимулов текстов на естественном языке с одновременной регистрацией активности мозга методом фМРТ. Получаемые таким образом нейросемантические карты распределены по головному мозгу, поэтому актуально исследовать паттерны этого

распределения. Работы по комплексному нейросемантическому картированию для русского языка, а также нейросемантическому картированию глубинных структур мозга, не были проведены. Диссертационная работа направлена на решение этих проблем.

Степень научной разработанности проблемы

В соответствии с подходом Лурии [4] высшие психические функции (в том числе речь) как сложные функциональные системы не могут быть локализованы в узких зонах коры головного мозга или в изолированных группах клеток, а должны охватывать сложные системы совместно работающих зон, каждая из которых вносит свой вклад в реализацию сложных психических процессов, и эти зоны могут располагаться в совершенно разных, иногда далеко отстоящих друг от друга областях мозга. Появление методов нейровизуализации позволило добиться значительного прогресса в экспериментальных нейросемантических исследованиях. Ранее для поиска нейросемантических локализаций использовалась методология когнитивного вычитания, в которой сравнивалось несколько наборов данных для экспериментального состояния и исходного состояния. Под исходным состоянием обычно подразумевалось состояние покоя, в котором мозг предположительно находится на минимуме своих энергетических и когнитивных возможностей. Однако это предположение оказалось неверным: отдых связан со значительным повышением активности в некоторых структурах мозга, называемых сетью режима по умолчанию (DMN).

Вопрос об общем распределении языковой семантики в мозгу человека получил значительное развитие относительно недавно, в работе Хута и его коллег [3]. Они изучали нейросемантическую репрезентацию английского языка с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) у семи испытуемых при использовании аудиально предъявленных стимульных текстов. Авторы отмечают два основных результата [3]. Во-первых, картирование мозга категорий естественного языка на идеализированной двумерной поверхности коры показало сходство с очертаниями DMN, характерными для состояния «отдыха». Во-вторых, эти репрезентации продемонстрировали широкую распределённость по мозгу без явных признаков изначально ожидаемой левополушарной асимметрии.

Таким образом, большинство предыдущих исследований были сделаны в слишком простой парадигме, где исследуется изолированная семантика отдельных слов или предложений. В своей публикации Хут представил подход к анализу общего распределения семантики слов английского языка в мозге человека при восприятии непрерывного звучащего текста. Данная работа посвящена расширению спектра методов решения этого вопроса, улучшению построения нейросемантических карт на всей поверхности мозга, и, впервые, применению данного метода к

анализу семантики русских текстов с применением лингвистических методов, разработанных на базе Национального корпуса русского языка.

Цель данной работы – разработка математического метода построения нейросемантических карт специфической активности головного мозга человека при восприятии и обработке семантической информации звучащего текста на естественном языке (на материале русского языка) и установление зависимостей между семантикой стимульного материала и локализацией нейрофизиологической активности на основе этого метода.

Основные научные задачи исследования

1. Разработать математическую модель активности областей головного мозга (по BOLD-сигналу фМРТ) в ответ на предъявление звучащего текста на естественном языке.
2. Подготовить и спланировать фМРТ-эксперимент, получить фМРТ-данные по восприятию звучащего текста носителями русского языка и провести предобработку этих данных.
3. Разработать процедуру выделения нейросемантических кластеров, описывающих сходные паттерны активности областей мозга в ответ на предъявление сходных семантических признаков в воспринимаемых текстах.
4. Разработать метод визуализации нейросемантических кластеров в модели головного мозга человека в виде нейросемантических карт.
5. Исследовать возможности разработанного метода построения и визуализации нейросемантических карт для анализа восприятия русских текстов на группе носителей русского языка.

Объектом данного исследования являются нейрональные сети головного мозга. **Предметом исследования** является возможная связь между семантикой стимульного материала и локализацией нейрофизиологической активности головного мозга.

Научная новизна результатов исследования

1. Разработан математический метод построения нейросемантических карт специфической активности коры (для трёхмерной модели, а также для развёрнутой на плоскости модели всей поверхности коры) и внутренних структур (трёхмерных моделей подкорковых структур, ствола и мозжечка) головного мозга человека при обработке семантической информации звучащего текста на естественном языке.
2. На основе применения разработанного метода к анализу фМРТ-данных для группы испытуемых, прослушивающих нарративные тексты на русском языке, показано, что нейросемантические кластеры широко распределены по поверхности коры и внутренним структурам головного мозга человека.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Теория нейросемантической парадигмы была развита в направлении усовершенствования визуализации нейросетевой активности мозга в ответ на предъявление семантических стимулов.
2. Разработанный метод может применяться при фундаментальных нейросемантических исследованиях высших психических функций, связанных с пониманием смыслов воспринимаемых испытуемыми текстов.
3. Создан инструментарий для кросскультурного сравнения пространственной локализации нейросетей головного мозга человека, принимающих участие в процессах понимания смыслов воспринимаемых текстов.
4. Данный метод может быть использован в медицине для нейросемантического картирования головного мозга при проведении нейрохирургических операций и нейрореабилитационных процедур у пациентов с нарушениями речи.
5. Нейросемантические репрезентации представляют особый интерес при разработке инновационных биоподобных архитектур в системах искусственного интеллекта и принятия решений.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Разработанный метод построения нейросемантических карт активности головного мозга человека позволяет успешно выделить и локализовать нейросемантические кластеры, связанные с семантической обработкой звучащего текста на естественном языке. Нейросемантические кластеры обладают тематическим единством семантики и соотносят сходные семантические категории со сходными паттернами активности областей мозга.
2. С помощью модели гемодинамического отклика вокселей головного мозга при обработке семантики текста можно прогнозировать активность вокселей головного мозга в ответ на предъявление новых текстов.
3. Разработанный метод позволяет выделять общие межиндивидуальные паттерны активности областей мозга для нейросемантических кластеров при анализе на группах испытуемых, состоящих из нескольких десятков человек.
4. Разработанный метод позволяет оценивать распределённость специфической активности головного мозга, связанной с выделенными нейросемантическими кластерами, по поверхности коры и по внутренним структурам головного мозга человека.

Обоснованность и достоверность результатов исследования

Аргументом в пользу верификации полученных результатов нейросемантического анализа с проведением нескольких стадий сложной математической обработки служит

тематическая осмысленность обнаруженных семантических кластерных групп. Ещё одним доказательством валидности и надёжности результатов служит обнаруженный факт высокой попарной корреляции индивидуальных данных по локализации вокселей серого вещества головного мозга внутри каждого кластера и относительной устойчивости их структуры при изменении параметров кластеризации. Показано, что локализация нейросемантических кластерных групп широко распределена в коре и внутренних структурах головного мозга, что аналогично наблюдалось для результатов нейросемантического картирования для стимульных текстов на английском языке.

Личный вклад автора

Вся описанная работа проведена лично автором в период с 2018 по 2024 гг. Автор принимал участие в формулировке целей и задач работ, по материалам которых написана диссертация; изучал научную литературу по теме исследований; вёл работу по разработке и программной реализации методики нейросемантического картирования и предобработке стимульного материала; разрабатывал программу эксперимента; тщательно анализировал результаты и формировал соответствующие выводы; докладывал полученные результаты на международных конференциях и семинарах Курчатовского института; принимал участие в написании статей по результатам работы.

Публикации и апробация работы

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 статьях, из них 8 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus [A1 – A8], и 3 статьи в научных изданиях, индексируемых в базе RSCI [A5 – A7]. Основные результаты диссертационной работы были представлены на международных и российских научных конференциях: IX международная конференция по когнитивной науке в рамках Первого национального конгресса по когнитивной науке, искусственному интеллекту и нейроинформатике (Москва, Россия, 2020); международная конференция «Лингвистический форум 2020: Язык и искусственный интеллект» (Москва, Россия, 2020); международная конференция по биологически инспирированным когнитивным архитектурам для искусственного интеллекта BICA*AI 2020 (Натал, Бразилия, 2020); XXIV международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2022» (Россия, Долгопрудный, 2022); XI международный конгресс по когнитивной лингвистике (Россия, Москва, 2022), а также на научных семинарах Центра языка и мозга НИУ «Высшая школа экономики», кафедры психофизиологии Нижегородского государственного университета, лаборатории по проблемам сенсорной физиологии Института проблем экологии и эволюции РАН и Института проблем передачи информации РАН.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения; основной части, состоящей из пяти глав, в которых изложено содержание диссертации; заключения, содержащего основные результаты и выводы; списка литературы.

Общий объем работы составляет 136 страниц машинописного текста, 45 рисунков, 3 таблицы, 38 формул и 155 цитируемых работ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении формулируются цели и задачи работы, обосновывается выбор темы работы, изложены актуальность и практическая значимость проведенных в рамках диссертационной работы исследований, обозначается научная новизна, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В первой главе представлен обзор существующих исследований по семантическому картированию активности головного мозга с целью выбора наиболее подходящих инструментов для анализа фМРТ-данных в парадигме предъявления текстов.

В разделе 1.1 рассмотрены основные методы исследования нейросемантики головного мозга человека. А именно метод когнитивного вычитания, метод межсубъектной корреляции, а также метод построения предиктивной модели активности мозга. Метод предиктивной модели представляется наиболее интересным из существующих для последующего развития и разработки собственного метода построений нейросемантических карт.

Так как метод основывается на обработке данных нейровизуализации, требуется рассмотреть и обосновать выбор наиболее подходящего способа получения таких данных. Поэтому в **разделе 1.2** подробно рассмотрены методы неинвазивной нейровизуализации, а именно наиболее широко применяемые ЭЭГ и фМРТ. Проведён их сравнительный анализ, при этом особое внимание уделено локализации источников активации, что существенно облегчает задачу построений нейросемантических карт.

Важным шагом к картированию нейросемантических репрезентаций является извлечение семантических компонент из слов. В **разделе 1.3** описаны основные методы разметки семантики текста из множества существующих лингвистических подходов к отражению семантики лексики, обоснован выбор метода на основе дистрибутивной семантики [5] как наиболее подходящего для нейрофизиологического картирования семантики текста из-за специфики обработки фМРТ-сигналов.

Нейросемантические исследования предполагают повоксельное описание активности мозга испытуемых в ответ на продолжительное акустическое предъявление осмысленного нарратива. **Во второй главе** описывается общая методика нейросемантического картирования, а

также детально рассматриваются проведённый эксперимент, испытуемые, стимульный материал и предобработка фМРТ-данных.

В **разделе 2.1** изложено, что в эксперименте приняли участие 25 испытуемых, подписавших информированное согласие на томографические исследования. Для частичного апробирования метода был проведён жёсткий отбор наиболее вовлеченных в восприятие и понимание содержимого нарративов испытуемых, который включал в себя субъективные (результаты опросников и тестов на содержание нарративов) и объективные (анализ разностных карт активации слуховых областей и структур мозга, связанных с эмоциональным восприятием и эпизодической памятью, а именно миндалин и гиппокампа) данные. В результате отбора способом пересечения этих критериев для дальнейшей обработки были взяты данные 7 лучших испытуемых в возрасте от 21 до 26 лет (все правши, среди них пять женщин).

В **разделе 2.2** описан сбалансированный план эксперимента, в котором порядок предъявления каждой из групп текстов систематически менялся по схеме Латинского квадрата. Внутри блоков порядок отдельных текстов менялся псевдослучайным образом. Рассказы были записаны профессиональным диктором и предъявлялись на слух в случайном порядке (каждый текст лишь один раз) испытуемым, находившимся в томографе Siemens Verio 3 Тл. Перед началом эксперимента проводились измерения индивидуальных анатомических особенностей мозга испытуемых и фМРТ состояния покоя. После эксперимента испытуемый отвечал на вопросы специальной анкеты.

Раздел 2.3 посвящен описанию стимульных текстов, используемых в эксперименте. В данной работе в качестве стимуляции использовались пять оригинальных лично значимых рассказов по 300 слов в каждом (всего 1500 различных словоформ), описывающих от первого лица некоторые актуальные общественно-политические и социальные проблемы на русском языке. Для последующего анализа каждому слову были присвоены семантическая (с помощью разработанного метода на основе дистрибутивной семантики) и временная разметки (с помощью программы для речевых аннотаций ELAN).

В **разделе 2.4** описаны параметры сканирования фМРТ, а также подробно изложена предобработка фМРТ-данных. Для повышения разрешающей способности фМРТ использовался параллельный протокол ультрабыстрого сканирования со временем повторения 1100 мс; за это время совершалось 56 сканов BOLD-ответов мозга толщиной 2 мм. Собственный шум томографа подавлялся специализированной аппаратурой.

Предобработка фМРТ-данных необходима для исправления артефактов и стандартизации расположения регионов мозга у разных испытуемых. Этапы предобработки включают визуализацию и удаление артефактов, коррекцию временного смещения, расчет

вектора движения головы и коррекцию данных по этому вектору, корегистрацию, сегментацию и нормализацию. Временные ряды сканируемых изображений накладываются на стандартную анатомическую модель для дальнейшей обработки. Предобработка данных проводится с использованием воксельного подхода и библиотеки SPM8 для MATLAB R2018a с целью минимизации ошибок и стандартизации регионов мозга. SPM8 – наиболее распространенный инструмент для визуализации функционально специализированных ответов мозга.

Раздел 2.5 описывает используемый в работе атлас мозга, который необходим для анализа сигналов фМРТ-данных. За основу был взят атлас Глассера для коры головного мозга [6] и атлас AAL для внутренних структур. Глассер создал атлас, совмещающий основные свойства атласов: архитектура, связность, функциональность и топография. Этот атлас переводится в MNI-пространство для совмещений с анатомическими и фМРТ-данными. Итоговый атлас коры и внутренних структур головного мозга человека содержит 401 зону: по 180 зон в каждом полушарии для серого вещества, по 20 зон в каждом полушарии для внутренних структур, и одна центральная зона.

В **разделе 2.6** кратко приводятся основные блоки центральной части разработанного метода нейросемантического картирования, а также его схема (рис. 1).



Рисунок 1 – Общая схема разработанного метода

В **третьей главе** рассказывается о методе нейросемантического картирования головного мозга человека, а также о каждом из блоков этого метода. В диссертационном исследовании был

разработан и реализован метод повоксельного моделирования и последующего картирования полученных кластеров. Все приведённые методы и алгоритмы были реализованы в программной среде MATLAB R2018b. Метод состоит из 6 блоков, показанных на диаграмме (рисунок 1):

1. Предобработка векторного представления текстов.
2. Предобработка записанных фМРТ-данных.
3. Построение регрессионной модели реакции вокселей на стимулы.
4. Поиск семантических кластеров.
5. Анализ групп на основе категорий.
6. Визуализация нейросемантических кластеров.

Блок 1 формализует семантику стимульного материала для дальнейшего анализа. Время начала и окончания каждого слова вручную аннотировалось в программном обеспечении ELAN в миллисекундах от начала текста. Для семантической разметки сначала каждому слову был приписан 300-мерный вектор `word2vec`, а после этого были выбраны 997 наиболее употребляемых русских слов [7] как семантические признаки, которые были размечены той же самой моделью `word2vec`. Каждое слово из текстов получило 997-мерный репрезентационный вектор как близость слова к каждому из 997 слов признаков. Блок 2 был изложен в разделе 2.4.

Блок 3 решает задачу соотнесения семантических признаков из стимульных текстов и BOLD-откликов на эти тексты. Регрессия методом наименьших квадратов может быть проблематичной из-за большого количества признаков, что приводит к переобучению. Проблема решается с помощью регуляризации. Метод перекрестной проверки был использован для нахождения оптимального регуляризирующего коэффициента α . Для разных значений α набор данных делится на обучающую и проверочную части. После этого выбирается α с лучшим прогнозом, и веса регрессии рассчитываются с использованием всего набора данных и этого α .

В блоке 4 производился анализ эффективности производительности полученной предиктивной модели. Было найдено подмножество наилучших вокселей с наибольшей корреляцией (от 0,16 до 0,54) между прогнозируемыми ответами на пятый текст и фактическими ответами BOLD. К весовым матрицам [Воксели x Признаки] для понижения размерности был применен метод главных компонент (PCA). Были построены матрицы счетов и нагрузок в пространстве первых четырех главных компонент с последующей проекцией слов-стимулов в это пространство. Затем были выбраны самые важные слова в этом пространстве, наиболее удаленные от центра облака всех слов. Для этого 1000 раз строилась выпуклая оболочка случайных 80% от всех слов, в процессе этого строился набор слов, попадающих на оболочку. Для полученного множества слов использовалась иерархическая кластеризация, в результате получено 12 кластеров. Для дальнейшего анализа были выбраны слова, имеющие сходство с

центром одного кластера на 15% больше, чем с центрами всех остальных кластеров для исключения слов с сопоставимыми расстояниями до центров нескольких кластеров.

Блок 5 расширяет понятие кластера и ищет межсубъектные категории на основе близости индивидуальных кластеров из блока 4. У 25 испытуемых выявлено 368 кластеров. Использовались три метрики поиска межкластерных расстояний: усреднение попарных расстояний слов, оно же с поправкой на внутрикластерные расстояния и расстояние между центрами кластеров. Для каждой метрики построены матрицы расстояний и гистограммы их распределений. Отсечка близости кластеров для нормальных распределений была определена как полтора среднеквадратичных отклонения влево от математического ожидания, и как 10% квантиль для ненормальных. Для бинарной матрицы всех расстояний меньше отсечки был построен граф, с его помощью были найдены подгруппы близких между собой кластеров.

Блок 6 занимается визуализацией полученных семантических кластеров на структуре серого вещества головного мозга человека. Так как каждое слово представлено как вектор в пространстве слов-признаков, а каждое из слов-признаков, в свою очередь, как вектор в пространстве весов модели на каждый воксель, можно построить проекцию векторов слов в пространство весов. Полученные веса каждого слова в каждом вокселе можно использовать при поиске локализованных представлений семантических кластеров.

Блок 6 визуализирует семантические кластеры на структурах коры и внутренних структур мозга человека. Проекция векторов слов в пространство весов позволяет найти локализованные представления семантических кластеров. Для индивидуальных данных карты создаются путем выбора вокселей с наибольшим весом, соответствующим семантическим кластерам. В случае групповых данных необходим предварительный анализ межсубъектных близостей индивидуальных репрезентаций – индивидуальные карты каждой группы пересекаются с точностью до 2 вокселей, а воксель считается входящим в карту, если в нём пересекается хотя бы 80% от максимального числа кластеров в группе.

В **четвертой главе** подробно сообщается о результатах применения разработанного метода к фактическим данными, а именно к анализу фМРТ данных для группы испытуемых, прослушивающих нарративные тексты на русском языке, а также построению нейросемантических карт на основе группового анализа.

Раздел 4.1 посвящен описанию лингвистической индексации стимульного материала. В результате такой индексации каждому слову из стимульного текста ставится в соответствие вектор из 997 близостей к словам-признакам (наиболее частотным словам русского языка). Был также построен массив временных отрезков предъявления слов. На этой основе сформирована многомерная стимульная матрица [Признаки x Временные отрезки]. Далее подсчитывались

стандартизованные оценки для этой матрицы, а также для матриц BOLD-сигналов, для возможности их дальнейшего сопоставления как безразмерных величин.

В разделе 4.2 детально описывается процедура обработки стимульной матрицы для её подготовки к задаче регрессии. Сначала надо привести временные ряды семантических признаков к временной шкале циклов фМРТ-сканирования (со временем повторения $TR = 1,1$ с), то есть сделать передискретизацию. Для этого использовался фильтр Ланцоша (рисунок 2).

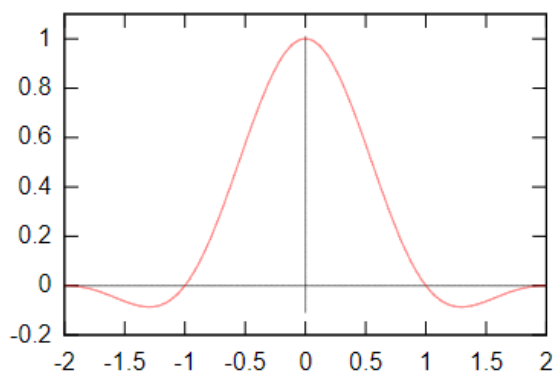


Рисунок 2 – Функция ядра Ланцоша

Следующий этап предварительной обработки матрицы стимулов – это учёт временных задержек, связанных с фМРТ-сканированием. BOLD сигнал увеличивается и уменьшается в соответствии с известным графиком (рисунок 3).

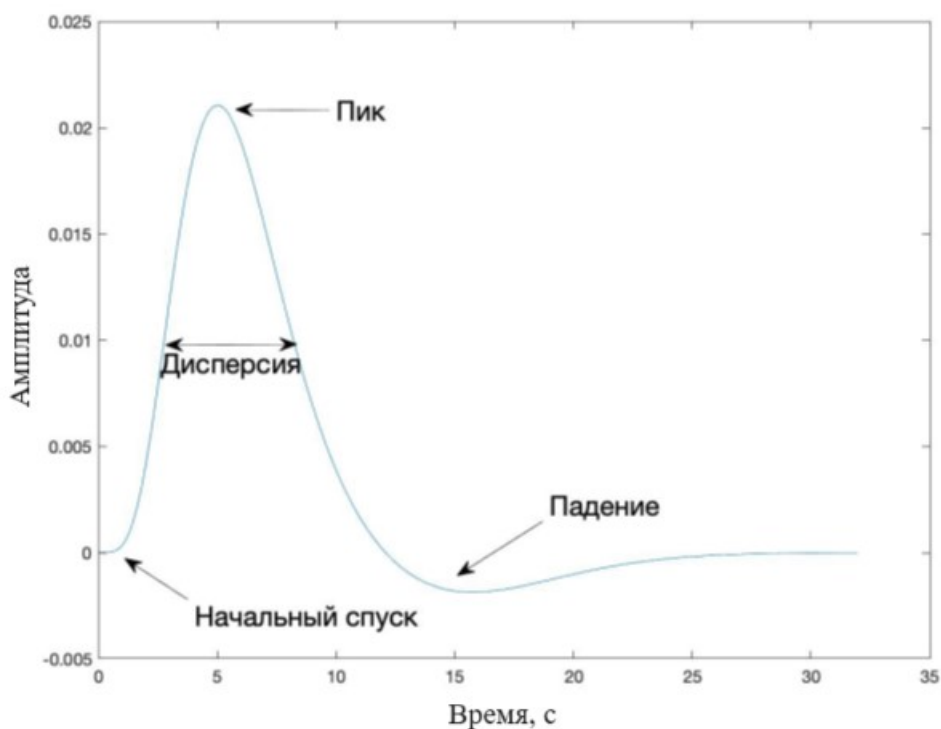


Рисунок 3 – Функция гемодинамического ответа (HRF)

Для аппроксимации этой кривой использовались задержки по пяти точкам – 3,3, 4,4, 5,5, 6,6 и 7,7 секунды. Было создано 5 копий временных рядов каждого признака с этими задержками. Пример временного ряда семантического признака представлен на рисунке 4.

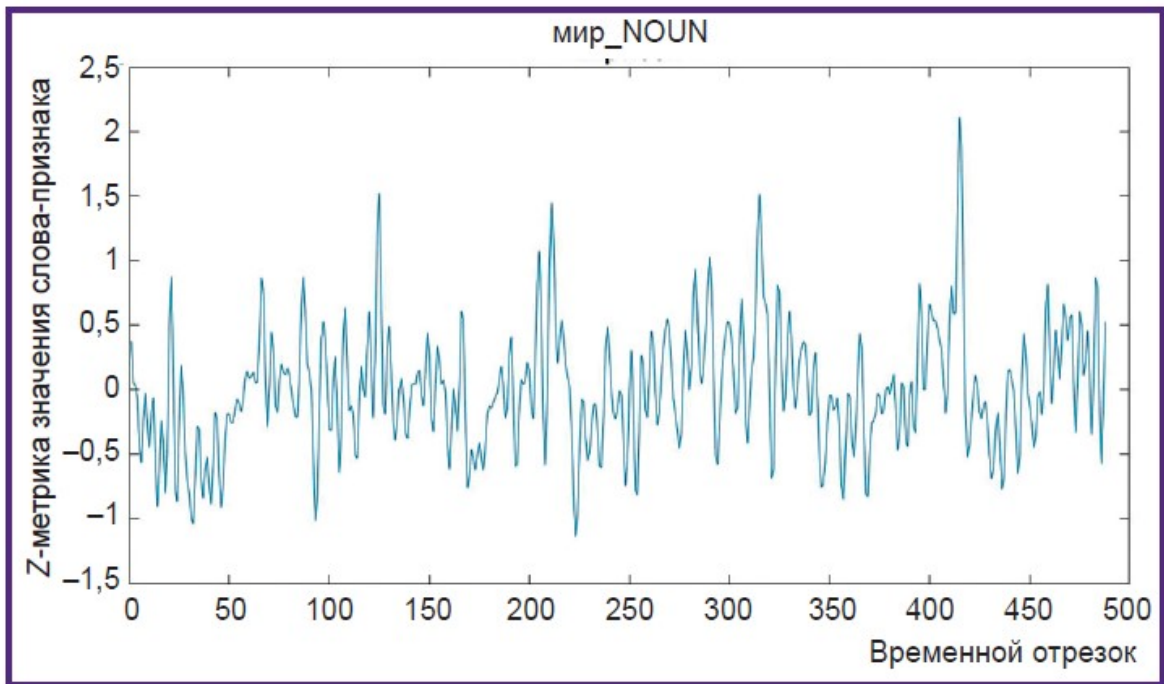


Рисунок 4 – Временная серия признака “мир_NOUN”

Раздел 4.3 рассказывает о регрессионной модели влияния 997 слов-признаков на BOLD-сигналы мозга. То есть, необходимо предсказать временные ряды активации мозга испытуемых в каждом вокселе и проверить их корреляцию с реальными фМРТ данными. Для присвоения веса каждого слова-признака в каждом вокселе использовалась процедура регуляризованной линейной регрессии [8]. Пусть R_j — это временной ряд BOLD-активации j -го вокселя, S_i — временной ряд i -го семантического слова-признака, а β_{ij} — коэффициент регрессии i -го семантического признака на j -ый воксель, t — временной отрезок, тогда:

$$R'_j = \sum_i \beta_{ji} S_i \quad (1)$$

Чтобы найти β , необходимо минимизировать сумму квадратов ошибок:

$$E_j(\beta) = \sum_t (R_{jt} - R'_{jt})^2 = \sum_t (R_{jt} - \sum_i \beta_{ji} S_{it})^2 \quad (2)$$

Метод наименьших квадратов не подходит, потому что число признаков (4985) значительно больше числа временных отсчётов (585). Здесь необходимо использовать метод регуляризации, смысл которой сводится к нахождению минимума следующего выражения:

$$E_j(\beta) = \sum_t (R_{jt} - \sum_i \beta_{ji} S_{it})^2 + \alpha \sum_i \beta_{ji}^2 \quad (3)$$

Или в матричной записи той же формулы:

$$E = \|Y - X\beta\|^2 + \alpha\|\beta\|^2, \quad (4)$$

где Y — это матрица сигнала BOLD [$t \times m$], X — стимульная матрица [$t \times p$], β — матрица весовых коэффициентов [$p \times m$]; α — коэффициент регуляризации; t — номер временного отрезка, m — номер вокселя, p — номер слова-признака.

585 временных отсчётов фМРТ-данных были разделены следующим образом: первые 467 отрезков использовались для построения матрицы весов, а последние 118 — для её верификации путем нахождения корреляции между временными рядами сигнала BOLD и их предсказанными значениями, полученными в результате перемножения стимульной и весовой матриц. В свою очередь, согласно процедуре кросс-валидации, первые 400 из 467 отрезков использовались для нахождения весов для каждого регуляризирующего коэффициента α в каждом вокселе, а последние 67 — для нахождения наилучшего α для данного вокселя. Эта процедура выполнялась для набора значений α от 1 до 1000. Для каждого значения α корреляции усреднялись по всем вокселям. Наилучший коэффициент регуляризации $\alpha = 12.7427$, поскольку он соответствует максимальной корреляции. С этим значением веса рассчитывались на всём наборе данных.

На рисунке 5 проиллюстрированы спрогнозированные с помощью вычисленных весов и реальные временные ряды BOLD. Как можно видеть, предсказанный BOLD-сигнал для коэффициента корреляции 0.3916 оказывается достаточно точным для анализируемых данных.

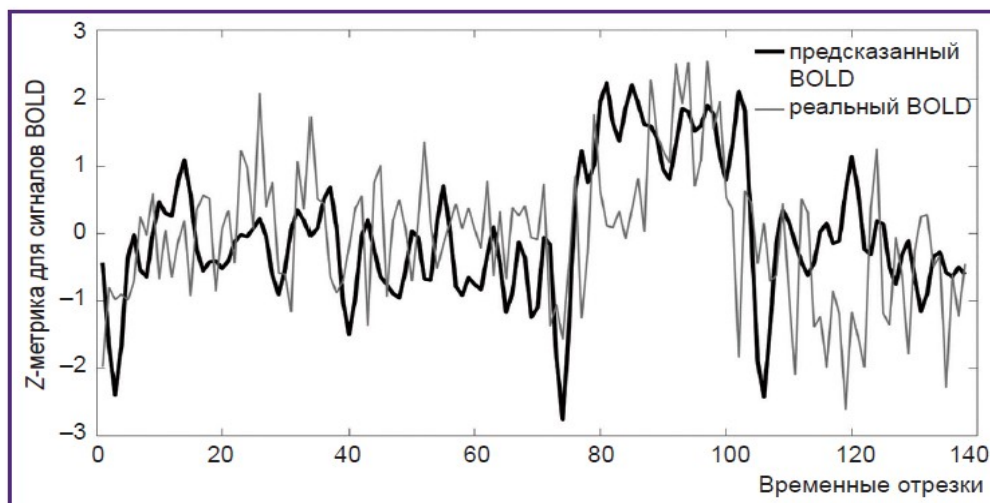


Рисунок 5 – Предсказанные и реальные BOLD-сигналы для коэффициента корреляции 0.3916

Чтобы найти наилучшие воксели, соответствующие семантическим характеристикам, представленным словами-стимулами, было выбрано 10 000 вокселей с наибольшей корреляцией между прогнозируемыми ответами на пятый текст и фактическими ответами BOLD. Коэффициенты корреляции варьируются от 0,1 до 0,54 (гистограмма распределения показана на

рисунке б). Эти воксели распределены примерно поровну по полушариям коры и по внутренним структурам головного мозга.

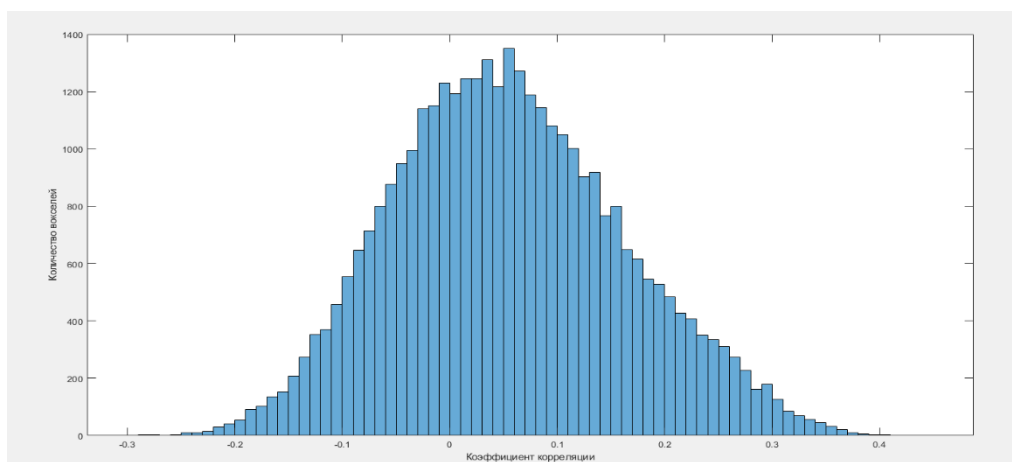


Рисунок 6 – Гистограмма корреляций всех вокселей

В разделе 4.4 описаны применяемые к матрице весов методы PCA анализа и кластеризации. Перед этим признаки усреднялись по всем пяти задержкам (то есть из 4985 было получено 997 признаков). Были построены матрицы счетов и нагрузок в пространстве главных компонент. После этого были спроецированы слова-стимулы в пространство первых четырех главных компонент, с помощью умножения каждого вектора слов на вектор признаков в пространстве PCA. Для отбора самых значимых слов случайным образом выбиралось 80% слов, и производился поиск их выпуклой оболочки в этом пространстве. После повторения этой процедуры 1000 раз был построен набор из 163 слов, которые встречались на оболочке хотя бы один раз. Проведена иерархическая агломеративная кластеризация (метод одинарной связи) на словах из этого набора. После изучения и лингвистической экспертизы древовидной диаграммы был выбран порог отсечки равный 1.

Таким образом, было сформировано 12 лексических кластеров мощностью от 5 до 23 слов. Некоторые слова имели сопоставимые расстояния до центров нескольких кластеров и, таким образом, не могли быть отнесены к одному кластеру. Поэтому была применена дополнительная фильтрация слов. Для дальнейшего анализа были выбраны слова, имеющие сходство с центром одного кластера на 15% больше, чем с центрами всех остальных кластеров. Эта фильтрация уменьшила количество слов до 111, а после пересчета центров кластеров новые кластеры оказались гораздо более компактными: расстояние каждого слова до центра своего кластера было более чем в 2 раза меньше, чем до центра любого другого кластера.

Раздел 4.5 посвящен процедуре маркировки кластеров. Чтобы оценить согласованность полученных кластеров и убедиться, что слова внутри каждого кластера имеют ассоциативную связь, понятную носителю языка, была применена методика именованная кластеров с помощью

независимых экспертных оценок. Всего было 5 экспертов, каждый из которых придерживался следующих правил: (1) для каждого кластера должно быть предложено три разных наименования, каждое из них должно быть существительным, (2) каждое из названий должно быть общим понятием, объединяющим наибольшее количество кластерных слов или название области (сферы жизни или деятельности), в котором обычно встречаются кластерные слова. После оценивания экспертами определялась согласованность маркировок экспертов. Таким образом, для каждого кластера было 15 слов-оценок. Кластер считался непротиворечивым, если он получил не менее трех одинаковых меток, т. е. трое из пяти экспертов предложили одну и ту же метку. Все новые кластеры были названы в соответствии с семантикой слов внутри каждого кластера – восстановление, город, угроза, событие, функция, противостояние, лишение, опыт, цель, созидание, порядок, попытка-движение (таблица 1). Эти кластеры были найдены для подмножества наилучших испытуемых, отобранных с помощью двух критериев – а) суммарное число активных вокселей как во всём мозге, так и в специфичных зонах эпизодической памяти (гиппокамп) и эмоционального восприятия (миндалины); б) оценок вовлечённости испытуемых в восприятие текстов через анкетирование.

Таблица 1 – Кластеры слов со сходной нейрофизиологической активацией

Название кластера	Кластер
Перестройка	заново, номер, обновить, построить, фрагмент
Город	город, далекий, дорога, знакомый, культурно-исторический, нынешний, область, оставаться, петлять, проезжать, проходить, раньше, связать, север, сегодня, стоять, стоять, центр, школа
Угроза	агрессивный, внушать, вызывать, вынужденный, оппонент, противник, сила, сильный, тяжело, угрожать, угроза, явный
Событие	год, день, картина, метро, название, посетить, появиться, праздник, сделать, событие, составить, состояться, тонна, эпизод
Коллектив	вовлекать, говорить, дружить, интересоваться, обращать, ответственный, понимать, руководитель, сотрудник, чувствовать
Война	благодарность, войско, выиграть, выступить, глава, граничить, заявление, известие, обвинение, окончиться, по-русски, победа, последовать, привести, припомнить, разгромный, случиться, спасти, уехать, уничтожить, штурм
Лишение	жертва, зуб, лишение, многократный, свыше

Опыт	возрастной, жизнестойкость, жизнь, заболевание, знание, изучение, интеллект, клинический, материал, мир, мозг, научный, нейропсихолог, одновременно, осознанный, пища, постоянно, работа, реакция, ребенок, сознание, чувство, эмоция
Цель	быстро, возможность, вокруг, восприятие, далеко, должен, казаться, меняться, многогранный, мочь, необходимый, нужный, очерчивать, понимание, поэтому, принципиально, процесс, сложный, среда, твердый, технология, форма, цель
Пространство	атмосфера, каждый, луч, набор, объем, правило, симметричный
Порядок	беспокоить, военный, вспоминать, декан, новость, обязанность, политик, президент, социолог, старший, участвовать, член
Попытка	велик, вступить, добраться, оказаться, пойти, попытаться, попытка, смочь, согласный, сориентироваться, трехцветный

В разделе 4.6 содержится описание группового анализа близости кластеров. Для получения более компактных семантических кластеров с целью последующего анализа их близости у разных испытуемых был разработан алгоритм их фильтрации с использованием расчёта внутрикластерной близости векторов слов в модели word2vec, а также близости к центрам кластеров. Отсечка иерархической кластеризации выбиралась для каждого испытуемого в индивидуальном порядке – исходя из наилучшей интерпретируемости получившихся кластеров. Расстояние между векторами считалось по косинусной метрике. Для каждого испытуемого проводилась чистка кластеров для их более компактного и семантически однородного представления – слово исключалось из кластера, если его вектор не близок к хотя бы половине векторов слов из этого кластера, а его близость к центру кластера больше, чем близость остальных слов из кластера до центра этого кластера.

Близость между кластерами разных испытуемых может быть вычислена по разным метрикам: усреднение попарных расстояний слов для кластеров, оно же, но с поправкой на внутрикластерные расстояния, а также расстояние между центрами кластеров. Как более сильный критерий было выбрано пересечение этих метрик. Пусть c_i и c_j — это интересующие кластеры, d – попарные расстояния между векторными представлениями слов кластера или кластеров (по косинусной метрике), а D – итоговое расстояние между кластерами, тогда:

$$D(c_i, c_j) = \overline{d(c_i, c_j)} - \frac{\overline{d(c_i)} + \overline{d(c_j)}}{2} \quad (5)$$

У 25 испытуемых было выявлено всего 368 кластеров (в среднем по $14,72 \pm 1,8148$ кластеров у испытуемого). Для всех этих кластеров были построены матрицы расстояний (по

каждой из метрик). Для определения отсечки близости кластеров в этих матрицах, для всех значений расстояний были построены гистограммы, их распределения были проверены на нормальность, для нормальных распределений отсечка взята как полтора среднеквадратичных отклонения влево от математического ожидания, а для ненормальных – как 10% квантиль. Для бинарной матрицы всех расстояний меньше отсечки по пересечению трёх метрик был построен граф, из которого было найдено несколько подгрупп близких между собой кластеров. Самая большая из этих подгрупп была разделена дополнительно на 10 кластерных групп с помощью метода k-средних, где каждый кластер представлялся как центр составляющих его слов по 300 компонентам word2vec. В таблице 2 приведены эти кластерные группы с примерами часто встречающихся в них слов. Эти группы найдены для общей группы всех испытуемых.

Таблица 2 – Группы семантических категорий

№	Название группы	Примеры слов, часто входящих в группу
1	Технологии	технология, экономика, информационный, знание, процесс, материал, принципиально, развитие, микроэлектроника, инфраструктура
2	Отношения	семья, родитель, дружить, жена, воспитать, ребенок, беседа, гость, родной, супруга
3	Субъективная активность	помешать, попытаться, найти, вызывать, прийти, смочь, спасти, угрожать, оказаться, сделать
4	Событие	последовать, состояться, начаться, окончиться, появиться, провести, проходить, случиться, проходить, случиться, привести, происходить
5	Чувственная сфера	вспоминать, чувствовать, беспокоить, видеть, слышать, понимать, уверенный, верить, внушать, говорить, буркнуть, интересоваться
6	Цель	должен, мочь, нужный, необходимый, цель, перспектива, попытаться, возможность, обязанность, разрешение
7	Экономика	объем, тонна, капиталовложение, потребление, тысяча, количество, продукция, рынок, составлять, насчитывать, производитель, продукт
8	Познание	страсть, жизнестойкость, сознание, чувство, жизнь, оптимизм, эмоция, восприятие, дух, впечатление, достижение, интеллект
9	Окружающий мир	луч, небо, поворот, поток, темнота, вода, око, освещать, очертание, петлять, невидимый, пестрый, фара, вокруг, дождь, звук, расстояние
10	Общество	руководитель, сотрудник, ответственный, руководство, декан, нейропсихолог, президент, факультет, обязанность, заявление
11	Город	улица, площадь, запад, север, город, окрестность, река, центр, граница, дом, дорога, метро, море, расположить
12	Политика	власть, гражданин, правительство, военный, глава, государство, война, гражданский, народ, иностранец

Раздел 4.7 отражает картирование нейросемантических кластеров на модельные структуры головного мозга. Поскольку каждый кластер представлен своими словами, а матрица весов содержит значение каждого вокселя для каждого слова-признака, была использована матрица стимулов в качестве матрицы преобразования векторов слов-признаков в вектора слов

из текстов, и путём перемножения двух матриц была получена матрица весов непосредственно для стимульных слов из текстов – каждое слово таким образом получает вес для каждого вокселя. Для подгруппы наилучших испытуемых было найдено по 250 наиболее репрезентативных вокселей для каждого слова в каждом кластере. Для анализа всей группы испытуемых была использована другая методика – только воксели с весом, большим, чем отсечка, определённая как два среднеквадратичных отклонения вправо от математического ожидания распределения объединённой матрицы весов по всем испытуемым. Для нахождения общих для группы вокселей индивидуальные карты каждой из семантических кластерных групп были пересечены с точностью до 2 вокселей, и сам воксель считался входящим в карту, если в нём пересекается хотя бы 80% от максимального числа кластеров в группе.

Эти нейросемантические воксельные репрезентации иногда имели общие воксели для разных кластеров. Для тщательной идентификации таких вокселей использовалась процедура пересечения. Воксели пересекались между всеми испытуемыми для каждого кластера и между всеми кластерами для каждого испытуемого. Часть вокселей принадлежала только одному кластеру (рисунок 7), а другие воксели, наоборот, были представлены во всех кластерах одновременно (рисунок 8). На рисунке 9 показано общее для группы 25 испытуемых распределение семантических категорий, выделенных в процессе поиска близких кластеров между разными испытуемыми. Для развёрнутой коры карты семантических категорий изображены на рисунке 10.

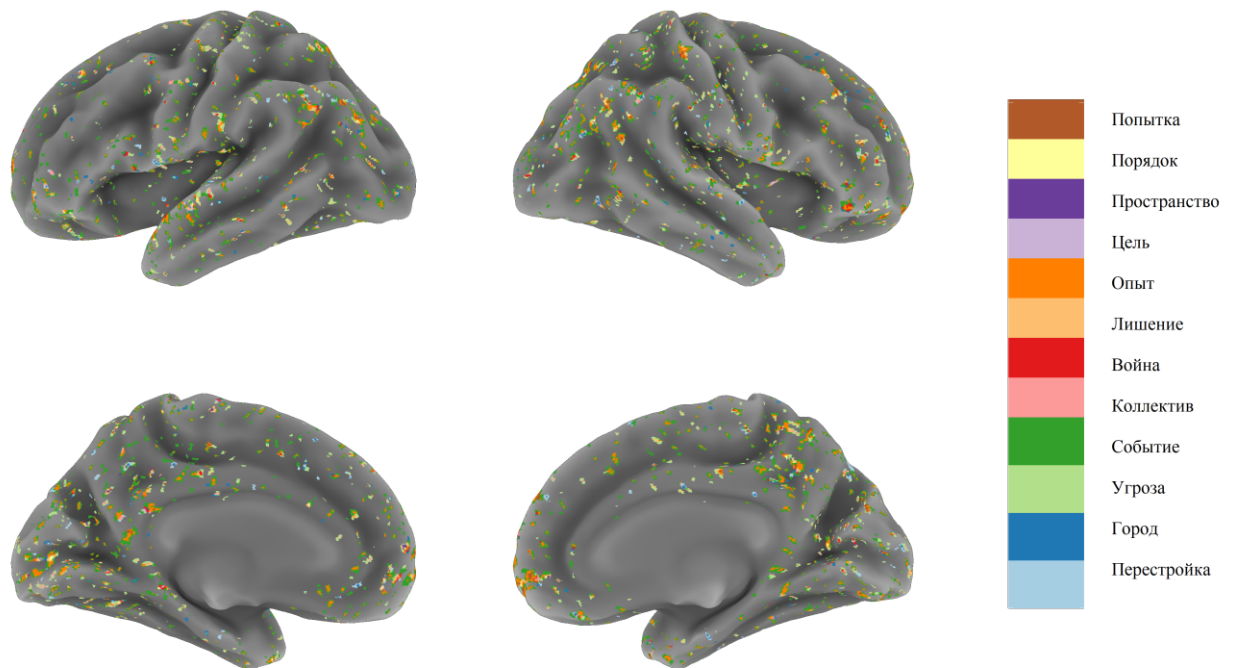


Рисунок 7 – Карты активных вокселей мозга для подгруппы лучших испытуемых по всем кластерам

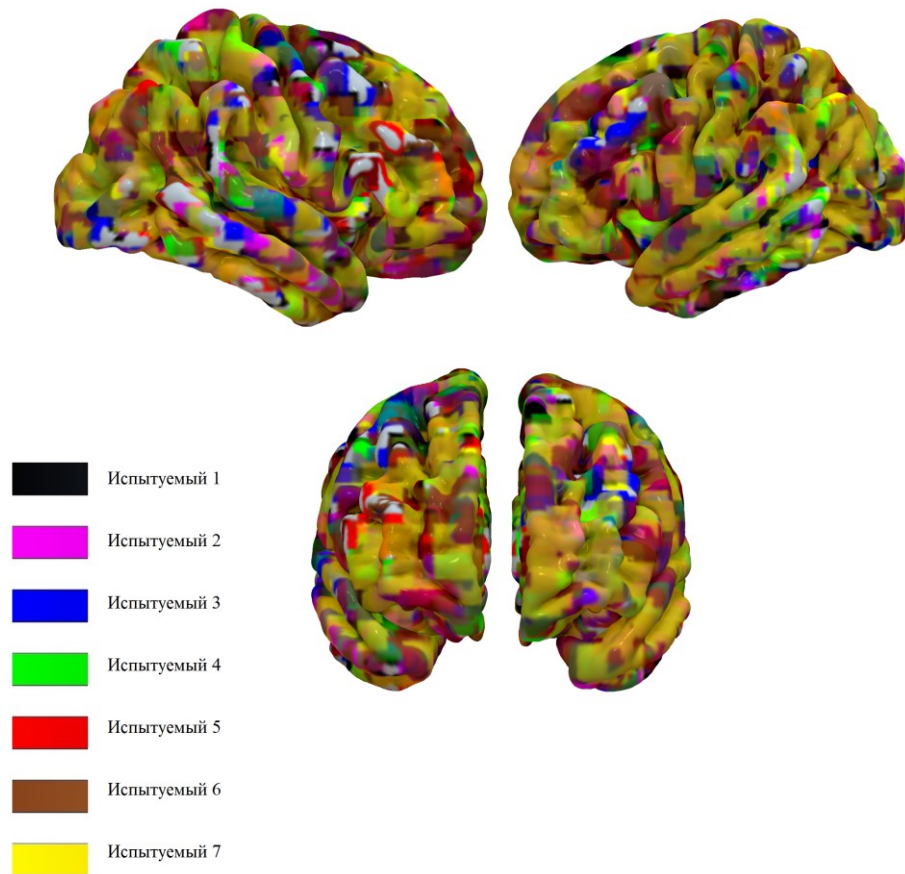


Рисунок 8 – Карты вокселей мозга, активных во всех кластерах

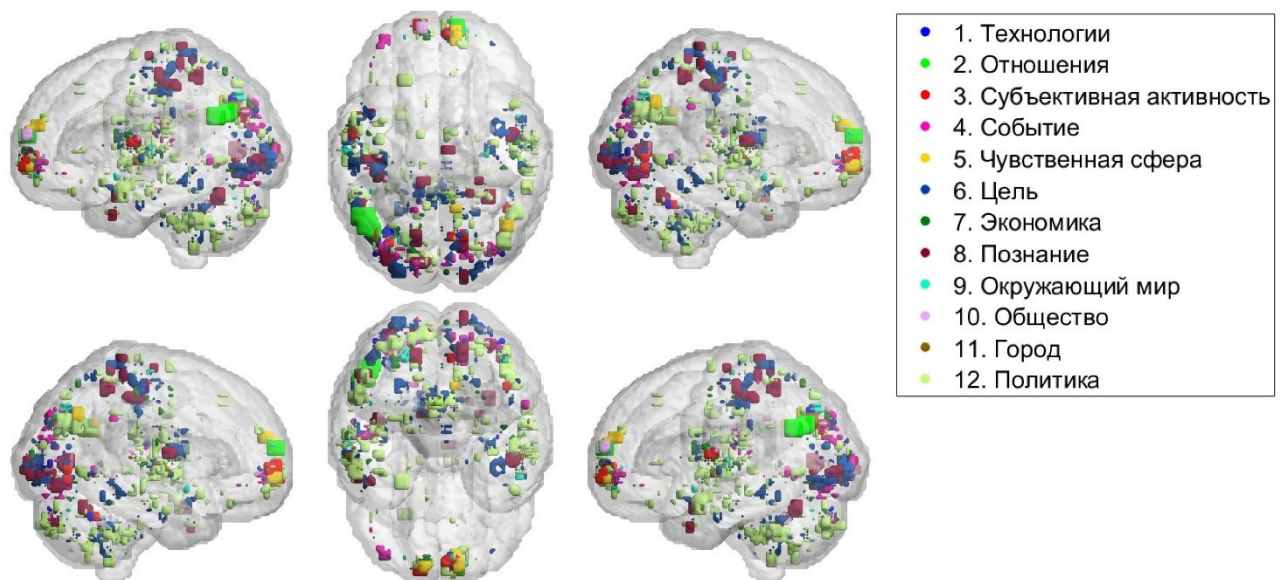


Рисунок 9 – Группы семантических категорий на полупрозрачной модели головного мозга

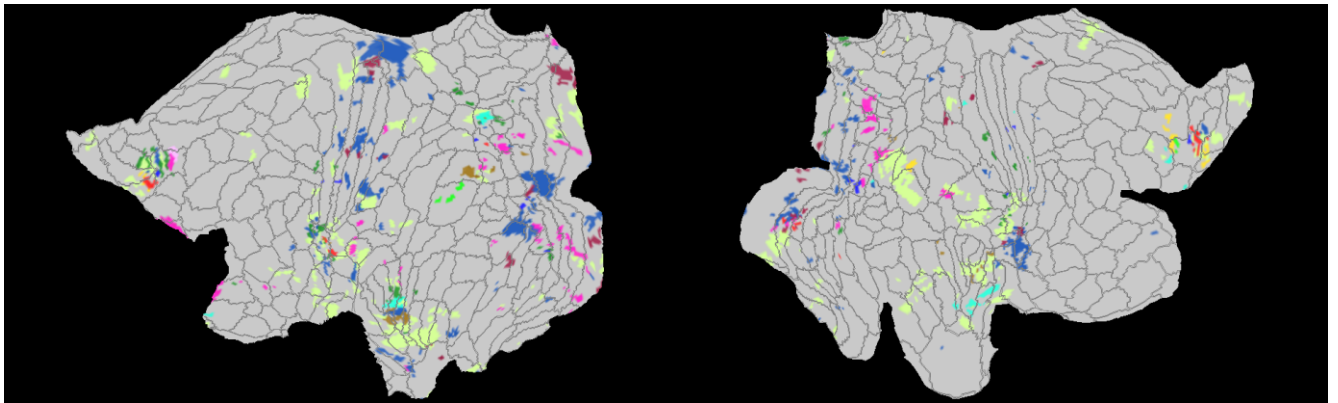


Рисунок 10 – Группы семантических категорий на развёрнутой карте коры серого вещества головного мозга, цветовые обозначения кластеров показаны на рисунке 10

В **пятой главе** приводится обсуждение результатов исследования, делаются выводы на основе статистики использования разработанных методов. Широкое совпадение результатов применения разработанного метода для русского языка с результатами для английского языка указывает на межъязыковую универсальность нейронной организации принципов лексического картирования в мозге и её относительную независимость от особенностей конкретных языков. Эти результаты подтверждают мнение о широко распространённом характере семантических представлений. Результат предвосхищался в литературе как теоретически, так и эмпирически.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана применительная к фМРТ-данным математическая модель повоксельного гемодинамического отклика в ответ на предъявление звучащего текста на естественном языке.
2. Для индивидуального и группового анализа разработаны математические методы выделения нейросемантических кластеров при восприятии испытуемыми звучащего нарративного текста на естественном языке.
3. Разработаны математические методы визуализации полученных нейросемантических кластеров в виде нейросемантических карт для трёхмерной модели коры и внутренних структур головного мозга человека, а также для развёрнутой на плоскости коры головного мозга человека.
4. Для группы 25 испытуемых в задаче восприятия звучащих текстов на русском языке на основе применения разработанных методов была выявлена система 12 нейросемантических кластеров, характеризующихся тематическим единством семантической информации (внутрикластерное расстояние по word2vec не превышает 0.56).
5. Для группы испытуемых были обнаружены как индивидуальные, так и общие паттерны активности (с точностью до 4 мм при перекрытии карт) областей мозга в ответ на предъявление звучащего текста на естественном языке.

6. Локализация нейросемантических кластеров имеет пространственно распределённый характер по коре и внутренним структурам серого вещества головного мозга (от 17 до 129 воксельных групп с мощностью от 5 до 43 вокселей в группе). Межполушарная асимметрия в нейросемантических картах отсутствует (разница в картах левого и правого полушария по всем зонам атласа не более 1.2%). Обнаружена фронтально-затылочная асимметрия нейросемантических кластеров – представленность нейросемантических карт в затылочных зонах выражена на 78.3% больше, чем во фронтальных.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов И.П. Проба физиологического понимания симптомологии истерии / Акад. И.П. Павлов. — Л.: Изд-во АН СССР, 1932.
2. Wehbe L., Murphy B., Talukdar P., Fyshe A., Ramdas A., Mitchell T. Simultaneously Uncovering the Patterns of Brain Regions Involved in Different Story Reading Subprocesses // PLoS One. — 2014. — Т. 9 — №. 11. — С. 1–19.
3. Huth A. G., Heer W. A. de, Griffiths T. L., Theunissen F. E., Gallant J. L. Natural speech reveals the semantic maps that tile human cerebral cortex // Nature. — 2016. — Т. 532 — №. 7600. — С. 453–458.
4. Лурия А. Р. Основные проблемы нейролингвистики. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1976.
5. Turney P. D., Pantel P. From Frequency to Meaning: Vector Space Models of Semantics // Journal of Artificial Intelligence Research. — 2010. — Т. 37. — С. 141–188.
6. Glasser M. F., Coalson T. S., Robinson E. C., Hacker C. D., Harwell J., Yacoub E., Ugurbil K., Andersson J., Beckmann C. F., Jenkinson M., Smith S. M., Essen D. C. van. A multi-modal parcellation of human cerebral cortex // Nature. — 2016. — Т. 536 — №. 7615. — С. 171–178.
7. Ляшевская О. Н., Шаров С. А. Частотный словарь современного русского языка (на материалах Национального корпуса русского языка). Москва: Азбуковник, 2009.
8. Тихонов А. Н. О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения // Доклады Академии наук СССР. — 1965. — Т. 163. — №. 3. — С. 591–594.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах из списка изданий, рекомендованных ВАК, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI:

- [A1] **Nosovets Z.A.**, Velichkovsky B.M., Zaidelman L.Y., Orlov V.A., Kartashov S.I., Kotov A.A., Ushakov V.L., Zobotkina V.I. Lateralization in Neurosemantics: Are Some Lexical Clusters More Equal Than Others? // Brain-Inspired Cognitive Architectures for Artificial Intelligence: BICA*AI 2020.

BICA 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2021. – V. 1310. – P. 350-358. – IF=0.6 (Scopus, за 5 лет). Объем – 0.8 п. л. DOI: 10.1007/978-3-030-65596-9_42.

[A2] **Nosovets Z.A.**, Velichkovsky B.M., Zaidelman L.Y., Orlov V.A., Kartashov S.I., Kotov A.A., Zobotkina V.I., Ushakov V.L. Voxel-Wise Localization of Brain Activity while Comprehending Oral Russian-Language Stories // *Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics*. Intercognsci 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2021. – V. 1358. – P. 293-306. – IF=0.6 (Scopus, за 5 лет). Объем – 1.2 п. л. DOI: 10.1007/978-3-030-71637-0_35.

[A3] Velichkovsky B.M., Kotov A.A., Zobotkina V.I., **Nosovets Z.A.**, Ushakov V.L., Goldberg E., Zaidelman, L.Y. Heteroglossia in Neurosemantics: The Case of a Word Cluster with Mentalist Content // *Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics*. Intercognsci 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2021. – V. 1358. – P. 307-318. – IF=0.6 (Scopus, за 5 лет). Объем – 1.1 п. л. DOI: 10.1007/978-3-030-71637-0_36.

[A4] Zaidelman L.Y., **Nosovets Z.A.**, Kotov A.A., Ushakov V.L., Zobotkina V.I., Velichkovsky B.M. Russian-language neurosemantics: Clustering of Word Meaning and Sense from the Oral Narratives // *Cognitive Systems Research*. – June 2021. – V. 67. – P. 60-65. – IF=3.8 (Scopus, за 5 лет). Объем – 0.9 п. л. DOI: 10.1016/j.cogsys.2021.01.001.

[A5] Величковский Б.М., Осипов Г.С., **Носовец З.А.**, Величковский Б.Б. Личностный смысл и решение творческих задач: современные нейрокогнитивные исследования // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2020. – № 3. – С. 3-14. – IF=0.6 (RSCI, за 5 лет). Объем – 1.1 п. л. DOI: 10.14357/20718594200301.

[A6] Величковский Б.М., Зайдельман Л.Я., Котов А.А., **Носовец З.А.**, Ушаков В.Л., Заботкина В.И. Природа нейросемантических репрезентаций: стимулы, значение и личностный смысл // *Вопросы психологии*. – 2020. – Т. 66. – № 3. – С. 132-147. – IF=1.0 (RSCI, за 5 лет). Объем – 1.2 п. л.

[A7] Величковский Б.М., Заботкина В.И., **Носовец З.А.**, Котов А.А., Зайдельман Л.Я., Карташов С.И., Коростелева А.Н., Малахов Д.Г., Орлов В.А., Зинина А.А., Гольдберг Э., Ушаков В.Л. Методология семантического картирования мозга с использованием многомерной индексации потока устного русского текста: опыт валидации и развития // *Современные технологии в медицине*. – 2020. – Т. 12 – № 2. – С. 14-26. – IF=0.9 (RSCI, за 5 лет). Объем – 1.3 п. л. DOI: 10.17691/stm2020.12.2.02.

[A8] **Nosovets Z.A.**, Ushakov V.L., Zaidelman L.Y., Kotov A.A. System of methods and algorithms for comprehensive neurosemantic mapping of the human brain // *Cognitive Systems Research*. – 2023. – V. 82 – N. 101122. – IF=3.8 (Scopus, за 5 лет). Объем – 1.3 п. л. DOI: 10.1016/j.cogsys.2023.05.011.