

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА  
на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Козлова Станислава Олеговича

на тему: «Картирование функциональной активности головного мозга  
человека с учётом уровня синхронизации вокселей по данным фМРТ»  
по специальности 1.5.2. Биофизика

**Актуальность исследования**

Диссертация Станислава Олеговича Козлова посвящена актуальной и практически значимой теме разработки методов выделения регионов по данным функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) с целью построения более точных нейросетевых моделей функциональной активности головного мозга человека в состоянии покоя. Работа затрагивает фундаментальные вопросы современной нейронауки, связанные с методологией исследования структурно-функциональной организации мозга, и одновременно имеет значительный потенциал для клинических приложений.

**Структура и содержание диссертации**

Диссертация структурирована логичным и методически обоснованным образом. Она состоит из введения, четырёх основных глав, заключения, основных результатов и выводов, списка литературы, содержащего 97 наименований. Общий объём работы составляет 129 страниц с 8 таблицами и 75 рисунками, что свидетельствует о тщательности подготовки и комплексности проведённого исследования.

Во **введении** автор обосновывает актуальность темы исследования, описывает степень разработанности выбранной области, чётко формулирует цель и задачи работы, определяет научную новизну и практическую значимость. Данное изложение позволяет получить целостное представление о замысле исследования и его месте в современных вопросах нейровизуализации.

**Первая глава** содержит комплексный теоретический обзор, охватывающий основы магнитно-резонансной томографии, принципы функциональной МРТ, теорию ядерного магнитного резонанса, механизмы нейроваскулярной связи и BOLD-сигнала. Освещены различные подходы к картированию головного мозга и построению соответствующих нейросетевых моделей головного мозга: использование функциональных и

структурных атласов, метод независимых компонент, а также различные методы кластеризации и статистического анализа. Подчеркнуты преимущества и ограничения каждого подхода, что позволяет обоснованно аргументировать необходимость разработки новой методики.

**Вторая глава** представляет детальное описание разработанного автором метода выделения пространственно-связанных функционально-однородных регионов (ПСФОР). Автор чётко определяет три ключевых критерия, на которых основан метод: (1) функциональная однородность регионов на основе уровня корреляции, (2) пространственная связность регионов, (3) непересекаемость выделяемых регионов. Проведённая формализация требований свидетельствует об аккуратности научного подхода. Описаны три основных этапа алгоритма: выделение множества потенциальных регионов, фильтрация по критериям перекрытия и размера, распределение вокселей между регионами по принципу наилучшей корреляции. Реализация метода выполнена на языке MATLAB и размещена в открытом доступе на платформе GitHub, что повышает доступность и воспроизводимость полученных результатов.

**Третья глава** посвящена экспериментальной апробации разработанного метода на фМРТ-датасете, полученного от 23 испытуемых в состоянии покоя. Проведён детальный анализ чувствительности метода к различным параметрам: уровню функциональной однородности, продолжительности временного интервала анализа, методам предварительной обработки данных (удаление автокорреляции и глобального сигнала). Автор демонстрирует влияние этих факторов на количество выделяемых регионов и вокселей, что свидетельствует о тщательности проведённого анализа.

Особое внимание уделено анализу сети по умолчанию (Default Mode Network, DMN) с использованием разработанного метода. Показано, что метод ПСФОР позволяет индивидуализировать структуру DMN и выявлять функционально однородные подрегионы в составе известных компонент этой сети, что открывает новые возможности для персонализированного анализа нейросетевых взаимодействий.

**Четвёртая глава** демонстрирует практическое применение метода ПСФОР к задаче клинической диагностики – бинарной классификации пациентов с диагнозом шизофрении на основе фМРТ данных состояния покоя. Проведено сравнение классификационной способности признаков, полученных с помощью метода ПСФОР, с признаками, рассчитанными на



основе известных в литературе подходов. Результаты показывают, что метод ПСФОР потенциально позволяет снизить размерность пространства признаков, выделяя наиболее информативные регионы для конкретного заболевания.

### **Научная новизна и теоретическая значимость**

Разработанный метод ПСФОР представляет собой оригинальное решение проблемы, на которую автор обращает внимание в начале диссертации: отсутствие прямого контроля уровня синхронизации (корреляции) динамики вокселей внутри выделяемых регионов при построении нейросетевых моделей. В отличие от существующих методов, которые лишь косвенно влияют на уровень функциональной однородности (например, через изменение количества выделяемых регионов), предложенный метод позволяет явно задавать и контролировать минимальный уровень корреляции между вокселями в пределах одного региона.

Требование пространственной связности вокселей в пределах одного региона является важной методологической особенностью, которая упрощает интерпретацию результатов. Методы, выделяющие пространственно-несвязанные компоненты, могут объединять воксели из анатомически удалённых областей мозга, что затрудняет биологическую интерпретацию результатов и затрудняет анализ межрегиональной функциональной коннективности.

Предложенный подход для индивидуализации структуры регионов головного мозга открывает новые возможности для персонализированной нейровизуализации и может способствовать разработке более точных моделей функциональной организации мозга, как в фундаментальных исследованиях головного мозга в норме, так и при патологии.

### **Практическая значимость**

Работа демонстрирует практический потенциал разработанного метода в клинических приложениях. Применение метода ПСФОР к задаче классификации пациентов с шизофренией свидетельствует о том, что выделяемые регионы могут содержать клинически релевантную информацию. Возможность снижения размерности признакового пространства при сохранении или улучшении классификационной способности имеет практическое значение для разработки систем поддержки принятия клинических решений.

## **Обоснованность научных положений, выводов и достоверность результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов цифровой обработки сигналов, корректным применением методов математической статистики и адекватной интерпретацией результатов. Экспериментальная база исследования (23 испытуемых) позволяет получить надёжные выводы о чувствительности и стабильности разработанного метода. Полученные в работе результаты согласуются с имеющимися литературными данными о индивидуальной функциональной организации мозга.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных журналах, индексируемых в авторитетных базах данных (Web of Science, Scopus, RSCI), и в изданиях из перечня, рекомендованного Минобрнауки России, по специальности 1.5.2 – Биофизика в соответствии с требованиями Диссертационного совета МГУ. Результаты были представлены на пяти международных и российских научных конференциях, включая престижные форумы в области нейронауки.

### **Замечания по диссертационной работе**

Несмотря на высокое качество проведённого исследования, имеются некоторые замечания, которые могли бы способствовать улучшению работы. Для клинической интерпретации результатов классификации шизофрении, было бы полезно более подробное обсуждение выделенных регионов, показавших наибольшую дифференцирующую способность, и их возможную клиническую интерпретацию в контексте известных нейробиологических механизмов шизофрении. Кроме того, хотя исследование включает данные по выделению регионов на данных одного испытуемого в разные промежутки времени, было бы интересно видеть более подробный анализ воспроизводимости выделяемых тех же самых регионов при повторном сканировании того же пациента (или при разделении данных одного испытуемого на две половины). Также, можно отметить отдельные незначительные стилистические погрешности и ошибки, которые не влияют на общее качество работы.

### **Заключительные замечания**

Диссертация Станислава Олеговича Козлова представляет собой завершённое научное исследование высокого качества, которое вносит значительный вклад в методологию нейровизуализации и анализа данных



функциональной МРТ. Разработанный метод поднимает реальную проблему, встречающуюся при построении нейросетевых моделей мозга, и предлагает практическое решение, сочетающее строгие математические обоснования с приложениями к клинически релевантным задачам.

Работа отвечает требованиям, предъявляемым Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук. Содержание диссертации соответствует специальности 1.5.2 – «Биофизика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пунктами 2.1–2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Козлов Станислав Олегович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.5.2 – «Биофизика».

Официальный оппонент:

Кандидат медицинских наук,

Старший научный сотрудник лаборатории высшей нервной деятельности человека ФГБУН Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН

Верхлютов Виталий Михайлович

«5» декабря 2025.

Контактные данные:

Тел.: +79031770926, e-mail: verkhliutov@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 03.03.01 – Физиология

Адрес места работы: 117485, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 5А, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН

Подпись Верхлютова В.М. удостоверяю:

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_