

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»

Диссертация Станислава Олеговича Козлова посвящена разработке и обоснованию нового алгоритмического метода для автоматизированного выделения функциональных регионов головного мозга из данных фМРТ. Работа представляет интерес как с точки зрения совершенствования методов анализа больших объёмов нейровизуализационных данных, так и с позиций развития нейротехнологий и систем обработки сигналов.

Актуальность темы обоснована фундаментальным недостатком существующих методов функционального картирования мозга: отсутствием синхронизации (корреляции) между динамиками вокселей внутри выделяемых регионов. Стандартные методы (атласные подходы, метод независимых компонент, кластеризация) не гарантируют коррелированность динамики вокселей в пределах одного региона. Результатом является искажение нейросетевых моделей, поскольку усреднение сигнала по некоррелированным вокселям не отражает реальную фазо-частотную структуру активности. Разработанный метод ПСФОР решает эту проблему путём введения явного критерия минимальной корреляции между вокселями в пределах региона, при этом дополнительное требование пространственной связности обеспечивает анатомическую интерпретируемость.

Практическое значение работы определяется возможностью применения разработанного метода в нейротехнологических приложениях, системах автоматизированной диагностики и исследованиях функциональной организации мозга. Реализация в MATLAB с открытым кодом способствует внедрению метода в научное сообщество.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, основных результатов и выводов, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 129 страниц машинописного текста, включая 75 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 97 наименований.

Во введении автор обосновывает актуальность темы исследования, описывает степень разработанности выбранной области, формулирует цели и задачи работы, положения, выносимые на защиту, определяет научную новизну и практическую значимость.

Глава 1 содержит теоретический обзор, охватывающий основные физические принципы, а также представляет обзор современных методов анализа фМРТ-данных. Соискатель систематизирует подходы, начиная от простых атласных методов и завершая статистическими и кластеризационными алгоритмами. Детально обсуждаются преимущества и ограничения каждого подхода, что подтверждает актуальность разработки нового метода.

В Главе 2 представлен разработанный автором метод для выделения пространственно-связанных функционально-однородных регионов (метод ПСФОР). Он основан на требованиях о функциональной однородности (корреляция Пирсона между вокселями внутри региона), пространственной связности вокселей и непересекаемости выделяемых регионов. Соискатель формализовал требования в математический подход. Реализация метода выполнена на языке программирования MATLAB и размещена в открытом доступе в репозитории GitHub.

Глава 3 содержит экспериментальную верификацию на выборке из 23 испытуемых. Проведён анализ чувствительности метода к параметрам (уровень корреляции, временной интервал, предварительная обработка). Демонстрируется влияние удаления автокорреляции и глобального сигнала на результаты. В этой главе соискатель провёл анализ известной функциональной

сети головного мозга «сеть по умолчанию», и продемонстрировал возможность индивидуализации структуры этой сети.

В Главе 4 автор демонстрирует применение метода ПСФОР к задаче бинарной классификации пациентов с шизофренией (36 пациентов и 36 – контроль). Автор использует стандартные методы машинного обучения. На основе разработанного метода достигнута точность 74%, что сравнимо с известными методами, на основе которых получена точность 76%. Существенным преимуществом разработанного метода является то, что точность классификации достигнута на существенно меньшем наборе регионов головного мозга.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке нового метода, который выполняет несколько известных в литературе требований:

- функциональная однородность – корреляция между динамиками вокселей внутри выделяемых регионов имеет заданный минимальный уровень;
- Пространственная связность – выделяемые регионы можно соотнести с анатомическими структурами;
- Непересекаемость – воксели однозначно определяются в какой-либо регион.

В отличие от существующих подходов, метод ПСФОР гарантирует, что каждый выделяемый регион состоит из коррелированных и топологически связанных вокселей.

Однако следует отметить, что концептуально метод относится к семейству локальных алгоритмов кластеризации с ограничениями связности, в частности он схож с region-growing методами, но использует требования о связности, как функциональной, так и пространственной. Таким образом, это не революционный, но практически полезный методологический вклад.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием и применением строгих математических методов и адекватной статистической обработкой данных. Экспериментальная база (23 испытуемых в исследовании чувствительности метода и задаче индивидуализации регионов, 72 испытуемых в задаче классификации) адекватна для демонстрации методологии. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в Web of Science, Scopus, RSCI.

Замечания

Несмотря на высокое качество проведённого исследования, имеются замечания, которые способствовали бы улучшению работы:

1. Физическое обоснование выбора коэффициента корреляции Пирсона как меры синхронизации. Целесообразно обсудить физическое обоснование этого выбора с точки зрения фМРТ-сигнала: как выбранные значения корреляции соотносятся с отношением сигнал/шум в фМРТ-данных? Какова чувствительность метода к уровню шума в исходных данных? Было бы также полезно обсудить альтернативные меры синхронизации (когерентность, фазовая синхронизация, взаимная информация) и их физический смысл в контексте BOLD-сигнала.

2. Индивидуальные вариации шумовых характеристик фМРТ-данных и их влияние на выделение регионов. Качество фМРТ-данных может значительно варьировать между испытуемыми в зависимости от их движения, положения в сканере, локальных эффектов неоднородности магнитного поля. Было бы важно анализировать как варьируется отношение сигнал/шум (SNR) в фМРТ-данных между испытуемыми и как это влияет на результаты разработанного метода.

Диссертация Козлова Станислава Олеговича представляет законченное исследование в области методологии обработки нейровизуализационных данных. Разработанный метод ПСФОР решает практическую задачу

автоматизированного выделения функциональных регионов с контролем пространственной связности и внутрирегиональной корреляции. Метод реализован, протестирован и применён к клинически релевантной задаче. Указанные замечания не умаляют значимости выполненной работы и касаются главным образом углубления теоретического анализа и обсуждения вычислительных аспектов метода.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам на соискание учёной степени кандидата наук. Содержание работы соответствует специальности 1.5.2 – «Биофизика» (по физико-математическим наукам) и критериям, определённым пунктами 2.1–2.5 Положения о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям «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», а её автор – Козлов Станислав Олегович – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.5.2 – «Биофизика».

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой нейротехнологий (Институт биологии и биомедицины), Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Казанцев Виктор Борисович

«16» декабря 2025г.

603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.03 – Радиофизика