

ОТЗЫВ

официального оппонента Бондаря Игоря Вечеславовича, профессора РАН, доктора биологических наук, профессора факультета живых систем НОЧУ ВО «Московский институт психоанализа» на диссертацию Малаховой Екатерины Юрьевны «Исследование и интерпретация при помощи искусственных нейронных сетей механизмов описания зрительных образов в нижневисочной коре головного мозга приматов», представленную на соискание ученой степени кандидата медицинских наук по специальности 1.5.5 - «Физиология человека и животных» в диссертационный совет 24.1.137.01 по защите кандидатских и докторских диссертаций при ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН

Актуальность темы диссертационной работы

Появившаяся в ходе сложного процесса эволюции зрительная система позвоночных животных и представляет собой уникальный биологический анализатор, которых с максимальным быстродействием обеспечивает не только восприятие внешнего мира, но и мгновенную оценку биологической значимости объектов — от распознавания угроз до идентификации социально релевантных сигналов (например, мимики, жестов). Такая способность анализировать информацию дистанционно, без прямого контакта с объектом, становится основой для выживания, адаптации и сложных форм коммуникации у животных. Основные исследования свойств зрительного анализатора были развернуты еще в середине XX века, однако, несмотря на десятилетия изысканий, принципы его работы остаются одной из ключевых загадок нейробиологии. Именно на изучение особенностей работы зрительной системы и нацелена диссертационная работа Малаховой Екатерины Юрьевны «Исследование и интерпретация при помощи искусственных нейронных сетей механизмов описания зрительных образов в нижневисочной коре головного мозга приматов».

Современные данные показывают, что зрительная система — это не просто «камера» для регистрации света, а динамическая сеть, интегрирующая сенсорные сигналы с памятью, эмоциями и прогностическими моделями мозга. Например, феномен предсказывающего кодирования (predictive coding) демонстрирует, что даже первичные зрительные области (V1) активно участвуют в сравнении ожиданий с реальностью, а не пассивно обрабатывают «пиксели» изображения. В этом контексте диссертационное исследование Малаховой Екатерины Юрьевны, посвященное комплексному изучению зрительной системы, приобретает особую актуальность. Использование автором комбинации методов — нейрофизиологических и вычислительных — соответствует современным требованиям к междисциплинарным исследованиям. Такой подход позволяет преодолеть ограничения «одноканальных» экспериментов и раскрыть системные принципы организации зрения, что особенно важно для развития нейротехнологий и лечения заболеваний, связанных с дисфункцией зрительного анализатора.

Актуальность работы Малаховой Е.Ю. лежит в плоскости преодоления ограничений традиционных методов изучения зрительной системы: применение генеративно-состязательных сетей для создания адаптивных стимулов решает проблему ограниченности

классических экспериментальных парадигм при детальном изучении свойств нейронов зрительной системы; интеграция моделей сверхточных сетей с нейрофизиологическими данными демонстрирует, как принципы обработки информации в биологических и искусственных системах взаимно обогащают друг друга, отвечая на запросы междисциплинарных исследований; онлайн-генерация стимулов на основе обратной связи сокращает время и ресурсы экспериментов, что критически важно для изучения динамических процессов в мозге в условиях растущего объема нейробиологических данных.

Степень обоснованности основных положений и выводов

Диссертационная работа базируется на объемных экспериментальных данных, полученных методом микроэлектродной регистрации активности нейронов в нижневисочной коре приматов, проведенных в лаборатории с серьезной репутацией: RIKEN Brain Science Institute (Япония). Соблюдение международных этических стандартов и строгость экспериментального протокола не вызывают сомнений, равно как и достаточный объем выборки, что обеспечивает статистическую мощность исследования.

Автор демонстрирует уверенное владение классическими методами анализа нейрофизиологических данных — расчётом индексов избирательности, оценкой пространственно-временной динамики активности, применением непараметрической статистики. Нельзя не отметить интеграцию современных подходов машинного обучения, таких как использование генеративных моделей для декодирования признакового пространства и кластеризации нейронных репрезентаций.

Положения, выносимые на защиту, подтверждаются экспериментальными данными, всеобъемлющим статистическим анализом и модельными расчётами. Верификация моделей на независимых подмножествах данных, безусловно, усиливает доверие к результатам.

Научная новизна полученных результатов и сделанных выводов

Соискатель предложила оригинальный подход к изучению работы моделей нижней височной коры, который включает инновационный метод генерации зрительных стимулов для изучения свойств искусственных нейронных сетей, задействованных в анализе зрительной информации. Екатерина Юрьевна Малахова применила генеративно-сопоставительные сети для создания адаптивных зрительных стимулов, направленно активирующих нейронные ансамбли искусственных нейронов сетей, что позволяет изучать их функции без ограничения фиксированными наборами изображений. В перспективе внедрение динамической генерации стимулов *во время* нейрофизиологических экспериментов позволит сократить время исследований и повысить их точность за счёт адаптивного подбора стимулов на основе обратной связи.

Разработанный соискателем подход сочетания сверточных и генеративно-состязательных сетей для управления активацией нейронных колонок открыл новые возможности изучения распределённого кодирования и взаимодействия нейронов в реальном времени. Результаты исследования позволяют установить прямые параллели между представлениями объектов в искусственных нейронных сетях и естественных популяциях нейронов зрительной системой. Методы интерпретации реакций нейронов и активности элементов сетей полезны как для нейронаук, так и для улучшения архитектур ИИ.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированных в диссертации

Исследование Екатерины Юрьевны Малаховой фокусируется на изучении нейронных механизмов, обеспечивающих распознавание зрительных паттернов в нижневисочной коре приматов — ключевой области, ответственной за формирование категориальных репрезентаций, инвариантное к преобразованиям восприятие объектов и интеграцию семантической информации в зрительном анализаторе. Данная работа вносит серьезный теоретический вклад в фундаментальное понимание принципов организации и функционирования высших сенсорных областей головного мозга. Кроме того, полученные результаты перспективны для решения актуальных прикладных задач: выявленные закономерности могут быть использованы для оптимизации архитектуры искусственных нейросетей, разработки интерфейсов «мозг-компьютер» нового поколения, а также совершенствования методов нейровизуализации, направленных на диагностику нарушений зрительного восприятия.

Апробация работы и публикации

Апробация ключевых тезисов исследования проведена в полной мере: результаты по теме диссертации изложены в 16 печатных изданиях и 20 докладах на международных и всероссийских конференциях.

Структура и содержание работы

Диссертация Малаховой Е.Ю. построена по схеме, в которой отдельным аспектам исследования посвящены разные главы. Тогда как первая глава полностью отдана под анализ литературных источников, то последующие главы объединяют как освещение методических подходов, так и обсуждение экспериментальных данных. Работа изложена на 141 листе и иллюстрирована 56 рисунками. Список литературы содержит 171 источник. В предоставленном тексте и иллюстрациях в полной мере раскрывается содержание исследования.

В первой главе диссертации представлен обзор ключевых исследований структурно-функциональной организации зрительной системы приматов, включая иерархическую

обработку информации в вентральном пути, классические работы по рецептивным полям, современные методы анализа нейрональной активности и применение искусственных нейронных сетей для моделирования зрительного восприятия. Особое внимание уделено эволюции подходов — от психофизических экспериментов до интеграции нейрофизиологических данных с вычислительными моделями, а также нерешённым вопросам, таким как механизмы инвариантности и роль высокоуровневых представлений. Для обзора свойственны системность, критичность и актуальность. **Системность** подхода демонстрируется тем фактом, что в тексте автор объединяет классические нейробиологические исследования с передовыми методами ИИ, демонстрируя преемственность и междисциплинарность в изучении зрительного восприятия. **Критический взгляд** обнаруживается в чётком обозначении пробелы в существующих работах (например, ограничения методов в изучении инвариантности), что обосновывает необходимость нового подхода. Фокус на интеграции нейронауки и машинного обучения соответствует современным трендам и усиливает практическую значимость исследования для обеих областей, что обуславливает **актуальность** анализа литературных источников.

Во второй главе проведены все детали, необходимые детали для понимания сути проведенного нейрофизиологического исследования. В работе регистрировали активности нейронов нижневисочной коры макак-резусов с использованием массивов микроэлектродов, отводящих популяционную активность в области TEad. Эксперимент включал предъявление 1550 стимулов (лица, объекты, пейзажи) с контролем размера, времени экспозиции и автоматическим смещением для минимизации адаптации. Анализ выявил высокую избирательность нейронов к лицам (70% локусов регистрации, индекс селективности к лицам ≥ 0.1), пространственную организацию активности (корреляция между ответами нейронов снижалась с расстоянием) и зависимость вариативности ответов от средней активации. Статистические методы при анализе стабильности ответов подтвердили устойчивость ответов в первых блоках и их ослабление в поздних, что подчеркивает роль временной динамики в обработке зрительной информации. Полученные оригинальные результаты при исследовании матриц корреляций подтвердили специализацию TEad в распознавании биологически значимых стимулов и указывают на возможную градиентную организацию нейронных репрезентаций.

В третьей главе исследована интеграция сверточных и генеративно-состязательных сетей для изучения функций нейронов нижневисочной коры. На основе данных нейрофизиологических экспериментов обучена модель VGG16, с высокой эффективностью предсказывающая активность нейрональных колонок, и реализован метод генерации стимулов через оптимизацию латентных кодов в GAN (PPGN). В онлайн-экспериментах созданные стимулы предъявлялись макакам, демонстрируя корреляцию предсказанных и реальных. Анализ данных выявил, что абстрактные паттерны, сгенерированные для максимизации активации, вызывали ответы, сопоставимые с естественными стимулами, подтверждая гипотезу о детекции сложных признаков. Метод позволил сократить время эксперимента за счёт

адаптивного подбора стимулов, но выявил ограничения (снижение точности в поздних блоках из-за утомления). Результаты подтвердили возможность управления нейрональной активностью через гибридные модели ИИ, открывая пути для неинвазивного изучения кодирования информации.

Соответствие содержания диссертации автореферату и указанной специальности

Автореферат отражает основное содержание работы, оформлен в соответствии с требованиями ВАК РФ и соответствует специальности 1.5.5. - Физиология человека и животных.

Замечания и вопросы

Безусловно, работа Е.Ю. Малаховой подготовлена на самом высоком уровне, тем не менее хотелось бы осудить определенные дискуссионные моменты:

1. В работе иерархическая модель зрительной системы представлена как основная парадигма, где информация последовательно обрабатывается от низших к высшим уровням. Хотелось бы понять, как современные представления о рекуррентных связях, параллельных каналах анализа зрительных признаков и динамической интеграции сигналов могут быть учтены при моделировании сложных функций зрительного анализатора?
2. Эксперименты по регистрации активности нейронов проведены на анестезированных животных, что закономерно поднимает вопрос о сопоставимости результатов с естественной активностью мозга в бодрствующем состоянии. Ранее было показано, анестезия может подавлять корковую возбудимость, нарушает баланс возбуждающих и тормозных сигналов, что может приводить к снижению избирательности нейронов к сложным стимулам. Как автор учитывал этот аспект в своих размышлениях о полученных результатах?
3. Хотелось бы понять отношение автора к современным данным о настройке соседних нейронов, формирующих колонки в коре головного мозга. Дело в том, что в последнее время появляются сведения, которые ставят под вопрос классические представления о колончатой организации, поскольку одновременно регистрируемые на одном электроде нейроны могут обладать не только разными селективными свойствами, но и по разному включаться в работу нейронных сетей (Park S.H. et al., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Малаховой Екатерины Юрьевны на тему «Исследование и интерпретация при помощи искусственных нейронных сетей механизмов описания зрительных образов в нижневисочной коре головного мозга приматов» является законченной самостоятельно выполненной научно-квалификационной исследовательской работой. Актуальность, научная новизна и методический уровень работы позволяют заключить, что диссертационная работа Малаховой Е.Ю. полностью соответствует п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 № 842 (с изменениями от 11.09.2021 г., № 1539), утвержденного Постановлением Правительства РФ, а ее автор, Екатерина Юрьевна Малахова, заслуживает присуждения ученой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.5 - Физиология человека и животных.

Доктор биологических наук, профессор РАН, профессор факультета живых систем, Негосударственное образовательное частное учреждение высшего образования «Московский институт психоанализа»

Бондарь Игорь Вечеславович

Подпись руки

Бондарь И.В.

заведую

21 мая 2025 г.

email: bondar_iv@inbox.ru;

Получено от Юрьева

тел.: +79169269399

« 21 » мая 2025 г.



Негосударственное образовательное частное учреждение высшего образования «Московский институт психоанализа»; 121170 Россия, г. Москва, Кутузовский проспект, д.34, стр.14