

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Цыбиной Юлии Александровны  
«ВЛИЯНИЕ АСТРОЦИТОВ НА КРАТКОВРЕМЕННУЮ ПАМЯТЬ В  
БИОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ НЕЙРОН-АСТРОЦИТАРНЫХ СЕТЕЙ МОЗГА»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальностям 1.5.2 – Биофизика и  
1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа Цыбиной Ю.А. посвящена исследованию механизмов кодирования информации в крупномасштабных нейрон-астроцитарных сетях мозга. Проведенные исследования имеют междисциплинарный характер, а тема диссертации является актуальной в таких областях науки как биофизика, нелинейная динамика и математическое моделирование.

В современной науке исследование когнитивных функций мозга является одним из приоритетных направлений. Применение высокотехнологичных экспериментальных методов нейробиологии позволяет получить достаточно детальное описание молекулярно-клеточных механизмов работы мозга, как на уровне отдельных клеток, так и на макроуровне функциональных сетей. Тем не менее, принципы реализации таких когнитивных функций как обучение и память остаются до сих пор неясными. Понять эти принципы могут помочь математические модели, такие как модели нейрон-астроцитарных взаимодействий, роль которых в передаче информации в мозге активно изучается в нейронауке в последние годы. Поскольку динамика нейронов и астроцитов происходит на существенно отличающихся временных масштабах (от миллисекунд в нейронах до десятков секунд в астроцитах), можно говорить о мультимасштабной сетевой задаче, где информация кодируется и перерабатывается через взаимодействия между различными слоями сети. Помимо теоретической ценности результатов диссертации для понимания фундаментальных биофизических механизмов обработки информации мозгом, реализованные автором модели нейрон-астроцитарного взаимодействия могут быть использованы при разработке интеллектуальных информационно-вычислительных платформ, предназначенных для обработки больших потоков информации.

Таким образом, представленная диссертация обладает высокой актуальностью, теоретической и практической значимостью и полностью соответствует паспортам специальностей 1.5.2 – Биофизика и 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Во введении обоснована актуальность работы, ее научная новизна и практическая значимость, а также сформулирована цель работы и приведены основные выводы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведено подробное исследование эффективности кратковременной памяти в биофизической модели нейрон-астроцитарной сети в зависимости от топологии астроцитарной сети и нейрон-астроцитарного взаимодействия, а также механизмов астроцитарной регуляции синаптической передачи. Хранение информации в кратковременной памяти модели осуществлялось за счет возникновения пространственно-распределенных стимул-специфичных паттернов кальциевой активности в астроцитарной сети. Проведен статистический анализ корреляции выходных сигналов нейронной сети с сигналами обучения в зависимости от размера ансамбля нейронов, взаимодействующего с одним астроцитом. Показано, что наибольшая эффективность кратковременной памяти достигается при нейронном ансамбле, состоящем из 16-25 нейронов, взаимодействующих с одним астроцитом. Выявлено, что блокирование астроцитарной модуляции синаптической передачи приводит к ухудшению реализации функций кратковременной памяти в модели нейрон-астроцитарной сети.

Вторая глава посвящена исследованию возможности хранения 8-битных (в градациях серого) изображений в кратковременной памяти модели нейрон-астроцитарной сети. Разработана сетевая модель, нейрон-астроцитарное взаимодействие в которой реализовано с учетом градуальной зависимости амплитуд кальциевых импульсов в астроците от интенсивности воздействия и с учетом астроцитарного воздействия на синаптическую передачу. Показано, что благодаря включению данного механизма двунаправленного нейрон-астроцитарного взаимодействия, биофизическая модель нейрон-астроцитарной сети способна эффективно хранить не только бинарные, но и 8-битные изображения. Для тестирования устойчивости хранения информационного сигнала в разработанной модели к шуму была иссле-

дована эффективность распознавания информационных сигналов в зависимости от дисперсии шума в тестовом изображении. Показано, что предложенная сетевая модель способна существенно улучшить качество искаженного шумом изображения.

В третьей главе разработана биофизическая модель нейрон-астроцитарной сети, способная хранить информацию за счет взаимодействия двух механизмов синаптической пластичности: кратковременной астроцитарной модуляции синаптической передачи и долговременной Хеббовской STDP пластичности (пластичности, зависящей от времени прихода спайков). Предложен новый алгоритм непрерывного ситуационного обучения и тестирования функции кратковременной памяти. Определена емкость памяти модели, которая составила 40 информационных сигналов. Изучено влияние параметров обучения синаптических связей в нейронных слоях модели на эффективность кратковременной памяти модели. Показано, что при высоких уровнях шума учет механизма астроцитарной модуляции синаптической передачи в модели спайковой нейронной сети, обученной по правилу Хеббовской STDP пластичности, увеличивает эффективность хранения информационных сигналов по сравнению с моделью сети, обученной только согласно правилу STDP.

Четвертая глава посвящена описанию разработанного автором программного комплекса, реализующего функции кратковременной и долговременной памяти на основе биофизических моделей нейрон-астроцитарных сетей, предназначенного для исследования сигнализации нейрон-астроцитарных сетей в процессе формирования кратковременной памяти в мозге. В главе также приведено обоснование выбора значений параметров реализованных моделей нейрон-астроцитарных сетей, а также приведены дополнительные результаты тестирования разработанных моделей, численных методов и алгоритмов.

В заключении приведены основные выводы работы.

Диссертация Цыбиной Ю.А. производит цельное впечатление. В ней решается логически связанный круг задач, связанных с разработкой и изучением математических моделей спайковых нейрон-астроцитарных сетей мозга, учитывающих астроцитарную модуляцию синаптической передачи. Представленные в диссертационной работе результаты обладают существенной научной новизной и свидетельствуют о высокой квалификации автора работы. Основные выводы и научные положения, сформулированные в диссертации, в достаточной степени обоснованы. Дос-

товерность научных выводов подтверждается их согласованностью между собой и с известными результатами других исследователей. Научная и практическая значимость результатов диссертационной работы определяется возможностью их использования при разработке нейроинтерфейсных систем, применяемых для обработки данных и классификации информации.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1) На рис. 1.4 и 1.5 в типичном случае корреляция выходных информационных сигналов с сигналом обучения уменьшается при увеличении дисперсии шума в тестовом сигнале. Однако можно наблюдать обратную ситуацию, при которой эта корреляция увеличивается с ростом дисперсии шума в тесте. Почему так происходит?

2) В разделе 2.2 утверждается, что в случае гауссовского шума предложенная модель нейрон-астроцитарной сети способна улучшить качество искаженного изображения на 30%, а в случае импульсного шума – на 50%. Однако, как следует из рис. 2.6, данное утверждение справедливо лишь для некоторых значений дисперсии шума в тестовом изображении. Например, в случае гауссовского шума улучшение качества искаженного шумом изображения на 30% наблюдается лишь при дисперсии шума, равной 1, а при дисперсии шума, меньшей 0.4, улучшения качества зашумленного изображения вообще не происходит.

3) Желательно пояснить, почему на рис. 3.8(а) корреляция выходных информационных сигналов с сигналами обучения при большой дисперсии шума в тесте оказывается выше для необученной сети (зеленая линия на графике), чем для обученной сети (красная линия на графике).

Несмотря на отмеченные недостатки, в целом диссертационная работа производит положительное впечатление. Диссертация представляет собой законченное научное исследование, в котором содержится решение задачи, имеющей существенное значение для биофизики и математического моделирования. Автореферат правильно отражает ее содержание.

Результаты диссертации достаточно полно представлены публикациями в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК, неоднократно докладывались на международных и российских научных конференциях. У автора диссертации имеется также 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Считаю, что диссертационная работа Цыбиной Юлии Александровны полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (п. 9-14), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 26.10.2023), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор работы заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.5.2 – Биофизика и 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

29.07.2024

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук

по специальности 01.04.03 – Радиоп физика,

профессор РАН,

главный научный сотрудник

Саратовского филиала Института радиотехники

и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Прохоров Михаил Дмитриевич

---

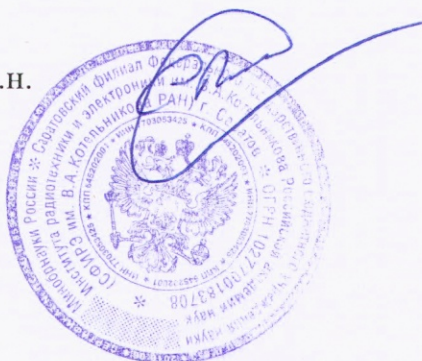
Рабочий адрес: 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38; Телефон: +79063105531;  
e-mail: mdprokhorov@yandex.ru

Согласен на обработку персональных данных

Подпись Прохорова М.Д. заверяю

Зам. директора СФ ИРЭ

им. В.А. Котельникова РАН, к.ф.-м.н.



Д.В. Фатеев