

В диссертационный совет 24.2.340.15
при Национальной исследовательской
Нижегородском государственном
университете им. И.И. Лобачевского



УТВЕРЖДАЮ:
Директор ИАНД и НФ РАН
Д.б.н. Малышев А.Ю.

25.11.2024

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Стасенко Сергея Викторовича «Сетевые модели управления динамическими режимами синапсов в реализации обучения и памяти», представленную к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 5.12.4 — «Когнитивное моделирование».

Актуальность темы диссертации. В современной нейробиологии активно развиваются методы и подходы исследования как молекулярных, так и сложных сетевых процессов, в которых задействованы различные клетки и структуры мозга. В настоящий момент очень активно изучается вопрос о том, какова роль глиальных клеток и межклеточного матрикса в регуляции нейронной активности. Предполагается, что влияние глиальных клеток на синаптическую передачу не ограничивается только вспомогательными функциями, такими как изоляция синаптического контакта от остального внеклеточного пространства или поглощение избыточного нейромедиатора из синаптической щели, но может включать в себя регуляцию синаптической передачи и пластичности на временах порядка секунд за счет высвобождения глутрансмиттеров, воздействуя на пре- и постсинаптические терминалы нейронов. Также было установлено, что экстраклеточный матрикс мозга, образующий вокруг тел нейронов и синапсов, так называемые

перинейрональные сети, способен участвовать в регуляции нейронной активности на значительно больших временных масштабах, чем глиальные клетки. Эти данные еще больше усложняют экспериментальные исследования функциональных систем мозга, обеспечивающих реализацию различных когнитивных функций, а также интерпретацию полученных в этих исследованиях результатов. Поэтому крайне востребованными являются новые математические модели, включающие описание глиальных клеток и экстраклеточного матрикса, для качественного и количественного представления данных, разработки и валидации гипотез и предсказания новых экспериментальных эффектов. Кроме того, эти модели могут стать значимым подспорьем и основой для создания новых биологически адекватных нейросетевых алгоритмов анализа данных и нейроморфных технических систем. Исходя из этого, диссертационную работу Стасенко С.В., посвященную сетевым моделям управления динамическими режимами синапсов в реализации обучения и памяти следует признать актуальной в рамках научной специальности 5.12.4 — «Когнитивное моделирование».

Сформулированная цель - исследование с использованием математического моделирования эффектов управления динамическими режимами синапсов на разных временных масштабах активной внеклеточной средой в реализации когнитивных процессов, в частности, обучения и памяти, для перехода от биологических к техническим системам, соответствует выбранной тематике.

Новизна полученных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые предложены математические модели управления динамическими режимами синапсов активной внеклеточной средой на временах порядка секунд в рамках среднеполевых моделей популяционной активности нейронов. Показано, что такие модели демонстрируют динамические режимы популяционной активности мозга, такие как регулярные осцилляции и

пачечная активность, лежащие в основе физиологических когнитивных процессов, в частности, обучения и памяти.

2. Впервые разработаны математические модели управления динамическими режимами синапсов активной внеклеточной средой на временах порядка минут в рамках среднеполевых моделей популяционной активности нейронов. Показано, что бистабильный динамический режим активной внеклеточной среды на временах порядка минут, лежащий в основе памяти, наблюдается в независимости от типа (положительной или отрицательной) регуляции нейронной активности.
3. Впервые разработана популяционная модель пачечной нейронной активности, учитывающая структурное и синаптическое управление динамическими режимами синапсов активной внеклеточной средой на разных временных масштабах. Показано, что такие регуляции на разных временных масштабах (от секунд до минут) позволяют не только формировать ритмогенез, но также управлять периодом и частотой наблюдаемых пачек.
4. Впервые показано, что управление динамическими режимами синапсов активной внеклеточной средой на временах порядка секунд приводит к мультистабильной синаптической динамике, частным проявлением которой является формирование бистабильного динамического режима импульсной нейронной сети с существованием асинхронной и синхронной активности нейронов.
5. Впервые предложена математическая модель нарушения синхронизации нейронов в мозгу и поддержания ритмогенеза при патологических изменениях активной внеклеточной среды, соответствующих, в частности, последствиям инфекции COVID-19.
6. Впервые предложена математическая модель формирования ритмогенеза нейронной сети за счет активности экстраклеточного матрикса мозга.

7. Впервые предложены математические модели первичной обработки визуальной информации в импульсной нейронной сети при пространственном и временном кодировании подаваемого изображения с учетом управления динамическими режимами синапсов активной внеклеточной средой.
8. Впервые предложена импульсная нейронная сеть с конкурирующими механизмами управления пачечной активности с учетом мемристивной пластичности и активной внеклеточной среды.
9. Впервые предложена модель обоняния на основе мемристивной пластичности, позволяющая эффективно распознавать тип и концентрацию предъявляемого запаха.
10. Впервые предложена гибридная математическая модель искусственной нейронной сети с эффектом памяти, опосредованной активной внеклеточной средой.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

Предложенные модели управления динамическими режимами синапсов активной внеклеточной средой в реализации обучения и памяти не только вносят новые представления об информационных процессах в мозге, но и имеют практическую значимость. В частности, предложенная модель нарушения ритмогенеза при ухудшении функций активной внеклеточной среды при инфицировании вирусом COVID-19 позволяет более широко исследовать механизмы появления постковидного синдрома, а также разрабатывать способы лечения и реабилитации, что крайне важно в связи с широким спектром системных нарушений при данном заболевании и большим негативным социальным эффектом. Также предложенные модели могут быть использованы при построении «сильного» искусственного интеллекта на основе принципов и механизмов функционирования мозга, а также использоваться в различных приложениях в области нейроморфных

вычислений и робототехники. Результаты работы также могут быть рекомендованы к использованию в учебном процессе для студентов и магистрантов биофизического и математического профиля.

Апробация работы и публикации. По материалам диссертации опубликовано 24 статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, из них 12 статей опубликованы в журналах, входящих в первый и второй квартили. Прикладной характер работы отмечен наличием 10 свидетельств о регистрации программ ЭВМ. Основные результаты диссертационной работы были представлены на международных и российских научных конференциях:

Volga Neuroscience Meeting-2016 24.07.2016-30.07.2016, г. Санкт-Петербург - г. Нижний Новгород; XXII научная конференция по радиофизике 15.05.2018 – 29.05.2018, г. Нижний Новгород; XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки), 22.05.2018 – 23.05.2018, г. Нижний Новгород; XXI Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2019», 02.10.2019-06.10.2019, Долгопрудный; 10th Annual International Conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures, BICA 2019, 15.08.2019-9.08.2019, г. Вашингтон, США; XIX Научная школа «Нелинейные волны - 2020», 29.02.2020 - 6.03.2020, г. Нижний Новгород; Международная конференция и молодежная школа «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии», 22.11.2021 - 26.11.2021, г. Нижний Новгород; The Third International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN), 13.09.2021-15.09.2021, г. Калининград; 74-я Всероссийская с международным участием школа-конференция молодых ученых «Биосистемы: организация, поведение, управление», 20.04.2021 – 23.04.2021, г. Нижний Новгород; 11th International Young Scientist Conference on Computational Science, 12.09.2022 - 17.09.2022, г. Санкт-Петербург; XX Научная школа «Нелинейные волны - 2022», 7.11.2022 - 13.11.2022, г. Нижний Новгород; 75-я Всероссийская с международным

участием школа-конференция молодых ученых «Биосистемы: организация, поведение, управление», 19.04.2022 – 22.04.2022, г. Нижний Новгород; The Fourth International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN), 14.09.2022-16.09.2022, г. Калининград; XXVI научная конференция по радиофизике, 13.05.2022 - 27.05.2022, г. Нижний Новгород; Международная конференция «Динамические системы. Теория и приложения», 26.06.2022 - 29.06.2022, г. Нижний Новгород; XXIV Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2022», 17.10.2022-21.10.2022, г. Москва; Международная конференция и молодежная школа «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии», 14.11.2022 - 17.11.2022, г. Нижний Новгород; XXX Всероссийская научная конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых - 2023», 15.05.2023 - 19.05.2023, г. Саратов; XXV Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2023», 23.10.2023-27.10.2023, г. Москва; The Fifth International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN), 18.09.2023-20.09.2023, г. Калининград.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается сопоставлением с результатами, полученными российскими и зарубежными учеными в данной предметной области, их публикацией в рецензируемых научных журналах, а также многократной апробацией результатов на научных конференциях и семинарах.

Соответствие содержания диссертации автореферату и указанной специальности:

Диссертация построена по классической схеме и изложена на 316 страницах, что в полной мере отражает результаты исследований. Работа состоит из введения, 6 глав, заключения и 2 приложений, содержит 115 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 724 наименования, что говорит о глубокой проработки современной состояния исследований в области. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация Стасенко Сергея Викторовича соответствует паспорту специальности 5.12.4. – Когнитивное моделирование по следующим пунктам: п. 1 – «Математическое и компьютерное моделирование когнитивных процессов у человека, животных и искусственных агентов» и п. 8 – «Искусственные нейронные сети (включая конволюционные и импульсные сети) при моделировании базовых когнитивных функций обучения, распознавания, запоминания фигуративной (образной), процедурной и декларативной информации.».

Содержание диссертационной работы соответствует специальности 5.12.4. – Когнитивное моделирование.

Диссертация выполнена на современном научном уровне, материал изложен последовательно и аргументировано, получены интересные и практически важные результаты, имеющие значения в развитии как теории информационных процессов в мозге, так и в разработке новых нейросетевых методов и алгоритмов обработки данных.

Замечания по диссертации:

1. В работе встречаются опечатки, к примеру, на стр. 68 “глильных клеток” или номер уравнения 5 на стр. 160.
2. На стр. 121 для модели нейрона Ходжкина-Хаксли указаны единицы измерения проводимости натриевых, калиевых и токов утечки мкСм/см², а не мСм/см² как это должно быть.
3. Какие единицы измерения переменной Q?
4. В тексте диссертации встречается термин “синаптическое масштабирование”, являющийся прямым переводом “synaptic scaling”, хотя в русскоязычной литературе используется перевод “синаптическое шкалирование”.

5. На стр. 29 используется термин «синхронизация вверх-вниз», который не является общеупотребимым, поэтому лучше было бы рассуждать в терминах гипер- и деполяризации или привести англоязычный термин (Up and Down states) в скобках.

Указанные замечания не ставят под сомнение достоверность полученных Стасенко С. В. результатов и не опровергают основных положений диссертации.

Диссертационная работа «Сетевые модели управления динамическими режимами синапсов в реализации обучения и памяти» Стасенко Сергея Викторовича соответствует требованиям пунктов 9-10 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 5.12.4 — «Когнитивное моделирование».

Отзыв заслушан и утвержден на расширенном заседании лаборатории математической нейробиологии обучения Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук (Протокол № 31 от 28 октября 2024)..

Отзыв составил:

Зав. лабораторией математической нейробиологии обучения ИВНД и НФ РАН, кандидат биологических наук Бобров Павел Дмитриевич
Специальность 03.00.13 «Физиология»

Подпись Т. Боброва П.Д.
УДОСТОВЕРЯЮ
Зав. лап. ИВНД и НФ
Кузьмина

Организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук»

Сайт: www.ihna.ru

E-mail: admin@ihna.ru

Тел: +7 (495) 334-70-00, факс: + 7 (499) 743-00-56

Почтовый адрес: г. Москва, ул. Бутлерова, д.5А, 117485