

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИВНД и НФ,
доктор биологических наук,
профессор РАН



/ А. Ю.

Мальщев

« 14 » ноября 2021 года

ОТЗЫВ

ведущей организации –

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук (ИВНД и НФ РАН) на диссертацию **Лобова Сергея Анатольевича** «Спайковые модели динамики и обучения локальных сетей нейронов мозга», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.5.2 – Биофизика

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа Лобова Сергея Анатольевича посвящена актуальному направлению математической биофизики – моделированию процессов функционирования и обучения нейронных сетей. В настоящее время можно наблюдать значительный разрыв между успехами современных технологий искусственных нейронных сетей глубокого обучения и попытками построения «живого компьютера», основанного на работе живых нейрональных культур, выращенных в условиях *in situ*. Данный разрыв свидетельствует о недостаточном понимании механизмов обучения в нейронных сетях мозга и об их принципиальных отличиях от правил обучения, сформулированных для систем, построенных на основе формальных нейронов. В связи с этим, в представленной работе ставится и решается крайне актуальная задача – исследование биологически релевантных импульсных (спайковых) моделей нейронных сетей, и разработка на их основе новых подходов к созданию самообучающихся нейроморфных систем и нейроинтерфейсных технологий. Актуальность работы подтверждается и растущим интересом исследователей к

этой тематике как у нас в стране, так и за рубежом, о чем свидетельствует существенный рост публикаций в этой тематике.

Таким образом, актуальность темы диссертации не вызывает сомнения, а сама работа полностью соответствует специальности 1.5.2 – биофизика.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 259 наименований. Общий объем диссертации составляет 328 страниц. Диссертационная работа имеет достаточно логично организованную структуру, характеризуется четким и ясным изложением материала.

Во введении работы приводится её актуальность, цель и следующие из неё задачи, формулируются основные положения и результаты, выносимые на защиту. Литературный обзор представлен в начале каждой главы, где освещается текущее состояние исследований по направлению, соответствующему тематике конкретной главы.

Первая глава посвящена описанию предмета и объекта исследования, разработке биофизической спайковой модели нейронной сети (СНС), а также реализации сопряжения искусственной нейронной сети с роботизированным внешними устройствами для последующей верификации моделей обучения, а также для использования в практических приложениях.

Во второй главе диссертационной работы изложены результаты исследования сетевой пластичности СНС. Для характеристики структурно-функционального состояния сети предлагается новый инструментарий, основанный на векторных полях синаптических и функциональных связей. Проводится анализ динамики глобальных характеристик сети при действии внешнего стимула – периодической стимуляции. Показано, что такая стимуляция приводит к усилению центробежных синаптических связей, что, в свою очередь, обеспечивает синхронизацию сетевых пачек импульсов с наносимыми стимулами. Исследованы свойства сетевой памяти. Разработанные в данной главе методы и проведенный анализ позволили определить основные факторы, лимитирующие обучение в СНС и предложить на последующих

этапах работы сетевые архитектуры и алгоритмы, обеспечивающие ассоциативное обучение.

Третья глава диссертации посвящена моделям нейрональных когнитивных карт. Предложена модель пространственной памяти с негативным подкреплением. Работоспособность модели продемонстрирована с помощью нейро-робота, избегающего опасной зоны и способного переобучаться при изменении ее локализации.

Расширена область применения модели обобщенных когнитивных карт, основанной на распространении возбуждения в СНС. Показано, что она может применяться не только в задаче навигации, но и в задаче сенсомоторного взаимодействия с внешним миром в динамически меняющихся условиях. В масштабном исследовании на основе компьютерного тестирования человека получено подтверждение предсказания модели о кодировании мозгом статических и динамических ситуаций в виде статических обобщенных когнитивных карт.

В четвертой главе диссертационной работы приводится описание практических приложений, разработанных на основе искусственных нейронных сетей. В частности, описывается нейромышечный (ЭМГ) интерфейс с командно-пропорциональным управлением внешних исполнительных устройств. Интерфейс оптимизирован по ряду характеристик, определены факторы, лимитирующие его использование. Показана возможность применения спайковых нейронов совместно с формальными в гибридной нейронной сети. Реализовано Хеббовское обучение в самоорганизующейся нейронной карте, способной после обучения кластеризовать ЭМГ-сигнал. Предложен нейромышечный интерфейс, полностью состоящий из спайковых нейронов. Работа интерфейса продемонстрирована в задаче управления различными устройствами: персональным компьютером, роботами, экзоскелетными комплексами, прототипом транспортного средства для людей с ограниченными двигательными возможностями.

Пятая глава посвящена исследованию ассоциативного обучения в СНС. Предложены архитектуры СНС, реализующие ассоциативное обучение на

основе временного и частотного кодирования. В контексте управления нейро-роботом реализовано моделирование условного рефлекса и оперантного обучения и показано, что нейро-робот способен к переобучению при изменении внешних стимулов. Реализован нейромышечный интерфейс на спайковых нейронах и предложен новый метод обучения СНС с учителем. Проведенное исследование позволило сформулировать ключевые принципы ассоциативного обучения: наличие Хеббовского правила обучения и элементы соревновательного процесса в нейронной сети в виде синаптической и нейронной конкуренции.

В заключении диссертационной работы приводится обобщение полученных результатов, и сделаны выводы.

Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

Научная новизна результатов, выводов и рекомендаций настоящей диссертационной работы не вызывает сомнений. Предложенные С.А. Лобовым многокомпонентная биофизическая спайковая модель и методы оценки структурно-функционального состояния нейронной сети существенно расширяют инструментарий исследователей в области теоретической и экспериментальной биофизики сложных систем. Полученные в работе результаты, касающиеся ассоциативного обучения вносят большой вклад в современную науку и понимание фундаментальных принципов работы нейронных сетей.

В качестве результатов, имеющих наибольшую значимость, можно выделить следующие.

– С помощью нового инструментария на основе построения векторных полей синаптических и функциональных связей обнаружены и исследованы эффекты глобальной сетевой пластичности, создающие основу для реализации обучения и памяти.

– С привлечением компьютерного психофизического тестирования получено подтверждение гипотезы биофизической модели нейрональных карт о

возможном кодировании мозгом статических и динамических ситуаций с помощью обобщенных когнитивных карт.

– Определены основные факторы, лимитирующие использование нейромышечного интерфейса. Продемонстрирована возможность значительного повышения производительности интерфейса в процессе тренировки испытуемых, что может быть использовано в дальнейшем в нейрореабилитационной практике.

– Предложены новые архитектуры спайковых нейронных сетей и способы их обучения, позволившие смоделировать ассоциативное обучение и продемонстрировать его на примере самообучающегося нейро-робота, а также в контуре электромиографического интерфейса.

Теоретическая значимость диссертационной работы определяется тем, что предложенные биофизические модели позволяют описать функционирование сетей нейронов мозга, функционирующих в естественных и искусственных условиях. Разработанные подходы, расширяющие существующие методы биофизики сложных систем, позволили проанализировать эффекты локальной синаптической пластичности на глобальном сетевом масштабе, обобщить гипотезу компактных когнитивных карт, выявить основные принципы обучения СНС и реализовать ассоциативное обучение как в варианте временного, так и частотного кодирования информации.

Практическая значимость работы заключается прежде всего в разработанных нейромышечных интерфейсах на основе искусственных нейронных сетей различной степени биологической релевантности. Работа интерфейсов продемонстрирована в контуре управления исполнительными устройствами, в том числе для целей нейрореабилитации. Кроме того, с практической точки зрения, отдельного внимания заслуживает нейрокибернетическое направление, развиваемое в работе. Предложенный в работе робот, управляемый спайковой нейронной сетью, может рассматриваться как прототип нейроуправляемого робототехнического устройства нового типа с элементами обучения и самоадаптации.

В качестве замечаний и вопросов можно выделить следующее:

- В предложенной спайковой модели используется упрощенная модель химического синапса, не учитывающая эффект шунтирования. Хотелось бы увидеть обоснование данного упрощения.

- В работе недостаточно обсуждаются перспективы развития разработанной сетевой модели при моделировании конкретных структур мозга.

- При моделировании распространяющегося в нейронной сети возбуждения в виде бегущих волн недостаточно подробно исследованы факторы, определяющие данный вид активности. В частности, не проанализирована роль тормозных нейронов сети.

- Волны нейрональной активности в коре и культуре нейронов, выращенных *in situ*, очевидно, реализуются через различные биофизические механизмы. Можно ли перенести предложенную с спайковую модель нейрональной активности для интерпретации экспериментов и моделирования работы мозга интактного животного *in vivo*?

Тем не менее, данные замечания и вопросы не влияют на научную и практическую значимость работы, а также на общее впечатление о высокой квалификации соискателя учёной степени.

Заключение

Суммируя вышесказанное, можно заключить, что в диссертационной работе Лобова С.А. представлены теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение, связанное с разработкой новых подходов к созданию самообучающихся нейроморфных систем и нейроинтерфейсов на основе спайковых нейронных сетей.

Диссертационная работа Лобова Сергея Анатольевича обладает существенной научной значимостью для развития биофизики в ее математической части, и по актуальности выбранной темы, степени научной новизны, полученным теоретическим и практическим результатам является законченной научно-квалификационной работой и соответствует паспорту специальности 1.5.2 – Биофизика.

Диссертация Лобова С.А. удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842 (в редакции от 20.03.2021), предъявляемым к докторским диссертациям, а автор работы, Лобов Сергей Анатольевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.5.2 – Биофизика.

Отзыв составил: в.н.с. лаборатории клеточной биологии обучения, д.б.н. Никитин Евгений Сергеевич.

Отзыв на диссертацию и автореферат рассмотрен, обсужден и принят на расширенном заседании лаборатории высшей нервной деятельности человека (протокол № 02 от 28.09.2021), в котором принимали участие 14 человек, в том числе 2 доктора физико-математических наук, 2 доктора биологических наук, 6 кандидатов биологических наук, кандидат медицинских наук и кандидат психологических наук.

Ведущий научный сотрудник
лаборатории клеточной
нейробиологии обучения
федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт высшей нервной
деятельности и нейрофизиологии
РАН, доктор биологических наук



Евгений Сергеевич

Никитин

117485, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 5А

ИВНД и НФ РАН

E-mail: admin@ihna.ru

Тел.: (495) 334-70-00 факс: (499)743-00-56