

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной работе  
Нижегородского государственного  
университета им. Н.И. Лобачевского

д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Иванченко Михаил Васильевич

«01» \_\_\_\_\_ 2021 г.



**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО**  
**ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ**  
**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»**  
(Регистрационный номер 18-21 от 01.06.2021)

на диссертацию Лобова Сергея Анатольевича «Спайковые модели динамики и обучения локальных сетей нейронов мозга» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 03.01.02 – биофизика

Настоящее заключение выдано на основании личного заявления соискателя ученой степени от 28.05.2021.

Диссертация выполнена на кафедре нейротехнологий Института биологии и биомедицины ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ им. Н.И. Лобачевского).

В 1998 г. закончил биологический факультет ННГУ им. Н.И. Лобачевского по специальности «биология», квалификация «биолог», специализация "биофизика".

В 2001 г. закончил аспирантуру ННГУ им. Н.И. Лобачевского. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности 03.00.12 – физиология и биохимия растений, ученой степени «кандидат биологических наук» присуждена диссертационным Советом Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского 27 ноября 2003г. Диплом кандидата биологических наук КТ №113814 от 06.02.2004 г.

В период подготовки диссертации Лобов Сергей Анатольевич работал на кафедре нейротехнологий Института биологии и биомедицины ННГУ им. Н.И. Лобачевского в должностях ассистент, старший преподаватель, доцент, научный сотрудник, старший научный сотрудник. Тема диссертации и научный консультант утверждены решением ученого совета Института биологии и биомедицины ННГУ им. Н.И. Лобачевского, протокол №3 от 30.10.2018.

**Научный консультант** доктор физико-математических наук, доцент, Казанцев Виктор Борисович работает заведующим кафедрой нейротехнологий Института биологии и биомедицины ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Материалы диссертации обсуждены на объединенном заседании кафедры нейротехнологий Института биологии и биомедицины и кафедры теории колебаний и автоматического регулирования радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского. По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**Оценка выполненной работы.** Диссертация Лобова С.А. является квалификационной работой, посвященной разработке новых подходов к созданию самообучающихся нейроморфных систем и нейроинтерфейсов на основе спайковых нейронных сетей.

**Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации.** Все предложенные в работе модели и все научные результаты

получены лично автором. Постановка задач и интерпретация результатов проводилась либо лично автором, либо совместно с научным консультантом и соавторами опубликованных работ. В публикациях и документах на результаты интеллектуальной деятельности, где С.А. Лобов указан первым либо последним автором (24 работы из 36), он выполнял ведущую роль в постановке задачи и ее решении.

**Степень достоверности результатов проведенных исследований, их новизна и практическая значимость.** Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов подтверждается их воспроизводимостью, обоснованным выбором параметров моделей и отсутствием противоречий с известными экспериментальными данными, сопоставлением с результатами исследований отечественных и зарубежных авторов в данной области, а также научной экспертизой на конференциях и при публикации материалов в рецензируемой научной печати.

**Научная новизна** работы заключается в разработке спайковых моделей нейронных сетей (СНС), в частности их архитектур и алгоритмов обучения, позволившее продемонстрировать динамические свойства и процессы ассоциативного обучения, характерные для сетей нейронов мозга. В частности:

- Разработана спайковая модель нейронной сети, отличающаяся наличием задержек передачи спайков в зависимости от расстояния между нейронами. Для обеспечения синаптической конкуренции впервые предложено совместное использование в модели долговременной синаптической пластичности STDP с функцией синаптического забывания.
- Разработан новый метод отображения структурно-функциональных характеристик нейронной сети с помощью векторного поля синаптических связей и поля спайковой активности (поля функциональных связей). При этом для построения векторного поля спайковой активности информация о межнейронных связях не учитывается, таким образом его можно использовать в качестве метода конструирования функционального коннектома в нейронных сетях, выращиваемых в условиях *in vitro*.
- Впервые показано, что при периодической локальной стимуляции нейронной сети наблюдается эффект сетевой синхронизации, связанной с усилением центробежных (по отношению к стимулируемой области) связей. Показано, что эффект сетевой синхронизации зависит от частоты периодического внешнего сигнала и от геометрических размеров зоны воздействия. Синхронизация нейронов сети впервые продемонстрирована с помощью нейроанимата, поведение которого меняется при возникновении синхронной высокочастотной активности в СНС.
- Впервые показан эффект стохастического резонанса в СНС: для возникновения STDP-опосредованной сетевой синхронизации необходим оптимальный уровень нейронного шума.
- Впервые предложена модель сетевой памяти, запись информации в которой опосредуется изменением эффективности синаптических связей, а процесс воспроизведения представляет собой функциональный ответ в виде сетевых пачек спайков, синхронизированных с наносимой стимуляцией. Обнаружена зависимость времени хранения следов памяти от уровня нейронного шума и ключевая роль нейронов-хабов в поддержании глобальной сетевой памяти
- Впервые предложена модель когнитивных карт на основе СНС с правилом обучения STDP, демонстрирующая свойства пространственной памяти с негативным подкреплением. Работоспособность модели протестирована с помощью нейроанимата, избегающего «опасные» зоны после обучения.
- Расширена область применения модели обобщенных когнитивных карт, основанной на распространении волнового фронта нейронной активности в СНС. Впервые предложен метод управления конечностями на основе данной модели и показано, что она может применяться не только в задаче навигации, но и в задаче сенсомоторного взаимодействия с внешним миром в динамически меняющихся условиях. Работоспособность расширенной модели продемонстрирована на примере управления конечностями антропоморфного робота. В условиях компьютерного тестирования человека впервые получено подтверждение предсказания модели обобщенных когнитивных карт о кодировании мозгом статических и динамических ситуаций в виде статических обобщенных когнитивных карт.

- Впервые предложено использование спайковых нейронов для извлечения характерного признака электромиографического (ЭМГ) сигнала и совмещение в рамках одной гибридной сети работы спайковых и формальных нейронов.
- Впервые предложен метод классификации ЭМГ-сигналов на основе самоорганизующихся нейронных карт. Показано, что взаимное расположение кластеров нейронной активности в обученной сети связано с пространственной топологией смещения кисти относительно центрального положения.
- Впервые показано, что правило обучения STDP может менять эффективность связей в зависимости от их пространственного положения в СНС. Сформулировано правило кратчайшего пути, согласно которому при наличии нескольких альтернативных путей распространения возбуждения потенцируется наиболее короткий. Предложенная сетевая архитектура с использованием правила кратчайшего пути позволила реализовать ассоциативное обучение в СНС на основе временного кодирования и продемонстрировать его с помощью самообучающегося нейроанимата в задаче избегания столкновений с препятствиями.
- Показана возможность ассоциативного обучения в СНС с частотным кодированием и впервые реализован нейромышечный интерфейс, полностью состоящий из спайковых нейронов. Также разработан новый метод обучения СНС с учителем, заключающийся во внешней стимуляции целевого нейрона при обучении.
- Разработанная спайковая модель нейронной сети, предложенные архитектуры и алгоритмы обучения позволили впервые сформулировать ключевые принципы ассоциативного обучения в СНС: наличие Хеббовского правила обучения, синаптическая конкуренция (конкуренция нейронных входов), и нейронная конкуренция (конкуренция нейронных выходов).

**Фундаментальная значимость** диссертационной работы определяется тем, что предложенные биофизические модели позволяют описать функционирование сетей нейронов мозга, функционирующих в естественных и искусственных условиях. Разработанные методы 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** обуславливается прежде всего востребованностью новых алгоритмов работы искусственных нейронных сетей, в частности их аппаратных реализаций на базе энергоэффективных импульсных элементов. Алгоритмической основой работы таких систем станут результаты исследований СНС, в том числе и полученные соискателем. Предложенный в работе самообучающийся нейроанимат, моделирующий условный рефлекс и ассоциативное обучение, можно рассматривать в качестве прототипа робототехнической системы нового поколения. Результаты диссертационной работы применяются в ряде практических приложений, использующих нейромышечный интерфейс на основе нейронных сетей. Результаты данных работ реализуются в коммерческих изделиях промышленных партнеров. Также необходимо отметить, что предложенные программные и программно-аппаратные комплексы активно используются в качестве методического обеспечения образовательных курсов, разработанных и читаемых соискателем.

**Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.** Основные материалы диссертации представлены 28 статьями в российских журналах их списка ВАК, включая «Математическая биология и биоинформатика», «Физиология человека», «Радиофизика», «Современные технологии в медицине» и рецензируемых международных журналах, включая Journal of Advanced Research, IEEE Access, Sensors, Frontiers in Neuroscience, Frontiers in Neurorobotics, European Physical Journal: Special Topics, Computational and Mathematical Methods in Medicine, Mathematical Modelling of Natural Phenomena. Также получено 8 охранных документов на результаты интеллектуальной деятельности. Результаты диссертационного исследования полностью изложены в опубликованных работах. Все публикации соответствуют специальности 03.01.02 – биофизика.

**Соответствие содержания диссертации специальности.** Работа отвечает требованиям, предъявляемым ВАК России к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 03.01.02 - «Биофизика».

**Наличие в диссертации ссылок на научные работы, выполненные соискателем ученой степени в соавторстве.** Ссылки на научные работы, выполненные соискателем ученой степени в соавторстве, имеются.

**Результаты проверки текста диссертации на предмет неправомерных заимствований.** Проверка текста диссертации не выявила неправомерных заимствований. Исследования являются оригинальными и представляются к защите впервые.

**Решение о возможности рекомендовать диссертацию к защите в диссертационном совете.** Диссертация Лобова Сергея Анатольевича «Спайковые модели динамики и обучения локальных сетей нейронов мозга» рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 03.01.02 – биофизика.

Заключение принято на объединенном заседании кафедры нейротехнологий института биологии и биомедицины и кафедры теории колебаний и автоматического регулирования радиофизического факультета 31.05.2021 г., протокол №16.

Присутствовало на заседании 26 человек, из них 12 докторов наук, 9 кандидатов наук.

**Результаты голосования:** «за» - 26 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет.

Председатель заседания  
декан радиофизического факультета,  
зав. кафедрой теории колебаний  
и автоматического регулирования  
ННГУ им. Н.И. Лобачевского  
д.ф.-м.н., профессор,



Валерий Владимирович Матросов