

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Лобова Сергея Анатольевича на тему «Спайковые модели динамики и обучения локальных сетей нейронов мозга» представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.5.2 – Биофизика

Диссертационная работа С.А. Лобова относится к одной из наиболее актуальных сфер современной биофизики – нейронаукам, с особым фокусом на их наиболее сложную и все еще слабо исследованную область – динамику нейрональных структур, связанных в сложные сети, способные к обучению. Одной из ключевых особенностей данной работы является ее комплексный характер, а именно эффективная комбинация теоретических моделей, включая разработанные автором новые подходы к анализу сетевой динамики, их ясной биофизической интерпретации, а также реализованных практических технических воплощений на основе роботов-аниматов, что имеет существенное значение как для прояснения фундаментальных биофизических вопросов взаимосвязи нейродинамики и биомеханики, так и для будущих технических и биомедицинских приложений.

Подтверждением актуальности и значимости работы является также публикация ее основных результатов в значительном числе статей в научных журналах, имеющих высокую репутацию в данной области и отмечаемый взрывной рост цитирования статей автора в последние годы, что свидетельствует о внимании международного научного сообщества к работам автора.

Работа прошла апробацию на достаточном количестве научных конференций высокого уровня, а также была поддержана значительным количеством научных грантов и программ.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и списка литературы.

Во **введении** приводится обоснование актуальности исследования на основе анализа степени разработанности темы, поставлена цель исследования и сформулированные задачи, соответствующие ее достижению, указаны достоверность и обоснованность научных результатов, их научная новизна, приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту, их научная и практическая значимости, сведения о методологии исследования, личном вкладе автора, апробации работы и научных публикациях, соответствующих ее содержанию.

В силу комплексности работы, литературный обзор представлен в начале каждой главы, где освещается текущее состояние исследований по направлению, соответствующему тематике конкретной главы.

Первая глава содержит обзор базовых представлений теории и практики построения сетей взаимодействующих нейронов как в моделях, так и в биофизическом эксперименте *in vitro*; в нем убедительно показана необходимость и актуальность исследований реалистичных моделей спайковых (а не формальных, используемых в вычислительных нейросетях) нейронов, как задачи, имеющей непосредственную связь с пониманием биофизических основ функционирования как мозга, так и более ограниченных обучающихся устройств, решающих частные задачи (например, на основе нейроаниматов).

На основе выявленных требований к базовой модели во второй части главы излагаются авторские результаты, посвященные разработке биофизической спайковой модели нейронной сети. Выбор модели Ижикевича как базовой для имитации динамики трансмембранного потенциала нейрона представляется исключительно удачным, так как он сочетает биофизическую реалистичность с высокой вычислительной эффективностью. Аналогичное заключение можно сделать относительно выбора моделей динамики медиатора и синаптической пластичности. В результате, работа построенных моделей убедительно показывает соответствие результатам, полученных для систем реальных нейрональных культур, то есть решает поставленную биофизическую задачу.

Вторая глава посвящена структурно-функциональным перестройкам, ответственных за синаптическую пластичность. В связи с тем, что данный эффект тесно связан с сетевой синхронизацией и перестройкой сетевого коннектома, в данном разделе работы предложен принципиально новый метод графического представления данного эффекта на основе двумерных векторных полей. Разработка такого подхода является, на мой взгляд, одним из наиболее сильных концептуальных результатов диссертации по двум причинам: во-первых, данное представление исключительно наглядно визуализирует возникновение сетевых хабов и перестройку структуры коннектома при локальной стимуляции, а во-вторых открывает новые возможности для дальнейшей разработки методов моделирования крупномасштабных процессов в сетевых структурах на языке потоковой динамики сплошных сред, ассоциируя с ней предложенные автором векторные поля, что особенно важно, т.к. задача отображения в векторные потоки процессов не на элементах связанных ближними связями, а на сложных системах графов является нетривиальной задачей математического моделирования в целом. В данной работе эффективность предложенного метода успешно продемонстрирована в ряде задач нейродинамики, будучи снабжена также подробным биофизическим анализом и обсуждением. Помимо этого, в главе приведены результаты тестирования и практической реализации анимата, функционирующего на выявленных принципах.

Третья глава продолжает рассмотрение вопросов, начатых во второй, концентрируясь на специальном вопросе представления ориентации в пространстве и сенсомоторной активности в целом. Введенное представление распределенной нейроактивности в виде векторного поля позволило автору предложить и убедительно проанализировать функционирование модели адаптивного обучения пространственной ориентации с негативным подкреплением. Кроме того, такой подход дал возможность построения наглядной биофизической модели предсказания двигательной активности на основе распространяющейся волны спайковой активности (можно заметить, что такой подход подтверждает недавно выдвинутую G. Buzsáki гипотезу «inside out»). Далее данный подход, основанный на построении когнитивных карт, был расширен на случай исследования управления конечностями. Помимо решения непосредственно биофизической задачи, объединяющей вопросы нейронауки и биомеханики, полученные результаты имеют большую перспективность практического приложения в робототехнике, включая возможные применения в области протезирования.

Четвертая глава посвящена именно последней области применения, излагая исследования в области нейромышечного интерфейса. Рассмотрены несколько подходов, первый из которых реализован при помощи связи на базе сетей формальных нейронов, анализирующих электромиографические сигналы, второй – с переходом к биологически релевантной форме обучения нейронных сетей – хеббовского обучения и использованию сетей спайковых нейронов. Проведенное исследование включает в себя как решение задач анализа и классификации сигналов, так и детальный биофизический эксперимент на основе физически реализованной системы, ее тестирования с участием живых людей и анализом выявленной функциональности. Таким образом, как теоретическая, так и практическая достоверность и значимость полученных результатов не вызывает сомнения.

Последняя, **пятая, глава** посвящена исследованию ассоциативного обучения при частотном и временном кодировании в протоколах многоэлектродной стимуляции и для различных конфигураций связи между нейронами. Как и в предыдущих главах, исследование объединяет теоретическую часть моделирования и анализа сетевой динамики, так и тестирование выявленных закономерностей с использованием аниматов. Интересной частью работы, представленной в главе, является моделирование формирования условного рефлекса и ассоциативного обучения, рассмотренное как с точки зрения динамики нейронных элементов, так и с точки зрения практических движений роботизированных устройств.

В заключении приведен синопсис основных полученных результатов, и далее сформулированы основные выводы по работе.

Таким образом, диссертационная работа представляет законченное комплексное исследование, представляющее результаты со значимой научной новизной, имеющих высокую теоретическую и практическую значимость, которые можно рассматривать как заложившее основы нового научно-практического направления.

Вместе с тем, к изложению соответствующего материала в тексте диссертации имеется ряд замечаний и комментариев.

1. Какие функции были использованы для построения фита сигмоидальных кривых на рис. 16? Аналогично, было бы интересно проанализировать возможные аналитические аппроксимации колоколообразных распределений, представленных на рис. 17: в частности, для мономодальной кривой, возможно более естественным было бы рассмотреть характерную дисперсию распределения по временам, а для сложных мультимодальных распределений — исследовать, возможно ли их представление в виде суперпозиции подобных распределений с различными амплитудами и временными сдвигами.
2. Каков характерных функциональный вид зависимостей скорости распространения активности на рис. 23? Визуально они сходны квадратным корнем; если это так, то возможно выявить определенное сходство с возникновением бегущей волны за счет взаимодействия с локальными связями в среднеполевых моделях типа Кендалла.
3. В текстовом описании метода векторного поля (с. 88-89), сопоставляемого межнейронным связям, имеется определенная путаница между именно векторами, заданными определением (29), и направленными связями, соединяющими нейроны. Именно последние “имеют пересечение с ячейкой”, а не вектора им сопоставленные.
4. Демонстрацию степени адекватности данных степенному закону (например, рис. 53 и 54, в последнем также несколько сомнительна точность фита на средней панели) нагляднее демонстрировать в двойных логарифмических координатах, а не в исходных.

Однако указанные замечания и вопросы относятся прежде всего к тексту представленной диссертации, не подвергая сомнению качество самих проведенных исследований, достоверность и обоснованность полученных результатов и сделанных из них выводов, их новизну и значимость, а также частично служат мотивацией для дальнейших исследований.

Автореферат содержит всю необходимую информацию и адекватно отражает содержание диссертации.

Таким образом, можно заключить, что данная диссертационная работа содержит всю необходимую совокупность оригинальных научных результатов, обобщений и выводов, которые можно квалифицировать как заметное научное достижение в области биофизики, удовлетворяет всем требованиям пп. 9–14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 20.03.2021), предъявляемых к докторским диссертациям, а её автор, Лобов Сергей Анатольевич, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.5.2 – Биофизика.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук (05.13.18 –

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент,

профессор кафедры физики и нанотехнологий,

заведующий отделом теоретической физики

Научно-исследовательского центра физики

конденсированного состояния

Курского государственного университета



Постников Евгений Борисович

Федеральное государственного бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Курский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Курский государственный университет»). Почтовый адрес: ул. Радищева, 33, Курск, 305000

Телефон: +7 (4712) 51-04-69; электронная почта: postnicov@gmail.com

Согласен на обработку персональных данных

