

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе и инновациям
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Пермский государственный
национальный исследовательский университет»,
доцент, кандидат географических наук



14.09.2026 А.Л. Ветров

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Пермский государственный национальный
исследовательский университет»**

о диссертационной работе Богатенко Татьяны Романовны на тему
«Колебательные процессы в малых ансамблях связанных моделей
нейронов», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика

Изучение принципов функционирования сложных ансамблей является одним из приоритетных направлений междисциплинарных исследований в радиофизике, биофизике и математических нейронауках. В плане сложности динамики можно условно выделить два случая. (1) Достаточно большие ансамбли, для которых уместно думать о термодинамическом пределе (или приближении к нему). (2) Малые ансамбли, в которых, с одной стороны, коллективные эффекты сильны, а с другой — индивидуальную динамику отдельного элемента нельзя свести к взаимодействию со средним полем, и вклад этого элемента в воздействие на другие элементы не достаточно мал на фоне вклада остальных элементов, чтобы можно было вводить осредненное макроскопическое описание. В некоторых отношениях, уместно говорить о том, что сложность коллективных явлений в малых ансамблях гораздо выше и разнообразнее, чем в «больших». Вопрос сложной динамики малых ансамблей тем более актуален для малых сетей нейронов, поскольку в некоторых тканях мозга различных видов животных экспериментально установлена очень высокая степень разреженности сети синаптических связей (число входящих связей около 10), а задачи эффективной обработки информации и сигналов, очевидно, должны решаться не на уровне среднеполевого взаимодействия. Это определяет **общую актуальность** диссертационной работы Т. Р. Богатенко. Непосредственная **актуальность** работы обусловлена тем, что исследование колебательных процессов в малых ансамблях связанных моделей нейронов может помочь

раскрыть фундаментальные механизмы работы нервной системы на микроуровне. В частности, проанализировать возможность моделировать динамику по крайней мере отдельных ритмов при помощи малых ансамблей моделей нейронов.

В рамках круга задач, к которым обращается данное диссертационное исследование, получен ряд результатов, обладающих **научной новизной**, заключающейся в следующем:

- Впервые систематически установлены механизмы синхронизации в малых ансамблях нейронов Ходжкина–Хаксли для различных типов и топологии системы связей и условий внешнего воздействия, описаны гистерезисные переходы;
- Выявлены новые типы динамического поведения в малых ансамблях нейронов Ходжкина–Хаксли;
- Показана возможность генерации биоподобных сигналов в малых сетях нейронов Ходжкина–Хаксли;
- Разработан новый подход к анализу ЭЭГ-сигналов.

Совокупность перечисленных новых результатов составляет **теоретическую значимость** работы, которая определяется тем, что понимание механизмов работы малых нейронных ансамблей является ключевым этапом для понимания принципов функционирования более масштабных нейронных сетей. При этом исследование малых ансамблей позволяет выявить фундаментальные закономерности передачи информации и формирования сложных динамических режимов. **Практическая значимость** работы связана с возможностью применения результатов при проектировании искусственных нейронных сетей и при анализе биологических нейронных ансамблей. Предложенный метод анализа сигналов ЭЭГ может найти практическое применение в биомедицинских целях при определении состояния анестезии пациента в научных экспериментах или в медицинских процедурах.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием классических методов численного моделирования сложных нелинейных процессов в сетях осцилляторов и апробированных методов спектрального, статистического и бифуркационного анализа, широко применяемых в радиофизике, сравнением с известными результатами, рецензированием публикаций в ведущих журналах, апробацией на научных конференциях.

В силу отмеченной теоретической и практической значимости исследования, можно ожидать, что его результаты будут востребованы широким кругом научно-исследовательских организаций и подразделений университетов, ведущих работу в области математических нейронаук и радиофизики, Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, Институт радиотехники и электроники им. В. А.

Котельникова РАН и его филиал в г. Саратов, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского и других.

По **структуре и содержанию** диссертационная работа Т. Р. Богатенко представляет собой научно-квалификационную работу, текст которой обладает внутренним единством в отношении заданной цели исследования. Он изложен логично и последовательно, включая введение, три главы, заключение и список литературы, отражающий знакомство автора с современным состоянием исследований в области науки, которой посвящена диссертация.

Во **Введении** обосновывается актуальность проблемы, которой посвящена диссертация, на основе чего сформулирована цель работы и поставленные соответствующие ей задачи, указана научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимости и положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения о методологии и методах исследования, достоверности соответствия паспорту специальности, апробации работы, публикациях и личном вкладе автора.

Первая глава посвящена детальному описанию модели нейрона Ходжкина–Хаксли, режимов ее динамики в зависимости от внешнего тока и исследованию динамики простейшего ансамбля из двух связанных нейронов. Для последнего изучается влияние силы и типа связей и внешнего периодического воздействия на динамику и синхронизацию нейронов, описываются гистерезисные переходы. Глава закладывает методологическую основу диссертации.

Во **второй главе** исследуется динамика ансамблей нейронов Ходжкина–Хаксли, состоящих из большего числа элементов — кольца и цепочки из трех нейронов, а также ансамбля из семи нейронов с промежуточным элементом-хабом. Для трех нейронов исследуется влияние управляющего тока в одном из нейронов и силы связи. Для семи нейронов цепочки трех взаимно связанных нейронов однонаправлено соединены через промежуточный нейрон-хаб, передающий сигнал с первого слоя на второй. Построены карты режимов нейрона-хаба и второго слоя.

Третья глава посвящена анализу экспериментальных данных электроэнцефалограмм (ЭЭГ) и сравнению их со спектральными характеристиками сигналов, полученных при моделировании. Основной фокус исследования направлен на анализ данных ЭЭГ лабораторных крыс, сравнение спектральных свойств реальных и модельных сигналов, разработку метода определения степени анестезии. Экспериментальный материал включает двухканальные записи ЭЭГ с

частотой дискретизации 2 кГц от двух групп крыс-самцов: группа, подвергавшаяся медикаментозной анестезии, и группа, получавшая газовый наркоз (изофлюран). Проводится сравнительный анализ возможности генерации синтетического сигнала активности нейронов с помощью малых ансамблей моделей Ходжкина–Хаксли, спектральные характеристики которых сопоставимы с экспериментальными данными ЭЭГ. В результате установлено, что малые ансамбли моделей нейронов способны воспроизводить спектральные характеристики, аналогичные реальным сигналам ЭЭГ, что открывает перспективы для создания синтетических данных для различных биомедицинских приложений.

В **заключении** приводятся основные выводы и результаты работы.

Количество **публикаций** по результатам, представленным в диссертационной работе, соответствует требованиям ВАК, среди них стоит выделить статьи в таких значимых международных научных журналах, как *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* и *Physics Letters A*, **апробация** работы прошла в виде докладов на ряде научных конференций, соответствующих отрасли науки, по которой диссертация представлена к защите.

Автореферат в достаточной мере отражает содержание диссертации.

Вместе с тем, к материалу, изложенному в тексте диссертации, имеется ряд вопросов и замечаний:

1. Для задачи о кольце однонаправлено связанных нейронов было бы интересно увидеть сопоставление с экспериментальными работами для бактериальных систем, где подобная топология сети связей трех элементов, принципиально не обладающих индивидуальной колебательной динамикой, обнаруживала коллективное колебательное поведение.
2. Вопрос масштабируемости полученных результатов на большие ансамбли не рассмотрен в работе подробно.
3. Больше внимания можно было бы уделить сравнению с альтернативными моделями нейронов.
4. Размер автореферата чрезмерно велик (24 стр.) для диссертации на соискание степени кандидата наук.
5. В тексте автореферата и диссертации для положений, выносимых на защиту, не указаны явно ссылки на статьи, в которых опубликованы поддерживающие утверждение материалы. Хотя при глубоком знакомстве с текстом это очевидно, и очевидно, что все положения опубликованы в рецензируемых статьях, такие явные ссылки помогают при знакомстве с диссертацией и ее оценке.

Замечания носят непринципиальный характер, не влияют на достоверность результатов и не снижают значимость работы.

Таким образом, можно заключить, что представленная диссертация является научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, в которой содержится решение совокупности научных задач, имеющих важное теоретическое и практическое значение в области радиофизики. Актуальность работы не вызывает сомнений. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.3.4. Радиофизика и требованиям пп. 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 (в текущей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Богатенко Татьяна Романовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Диссертация, автореферат и текст настоящего отзыва обсуждены и одобрены на заседании Ученого совета Физико-математического института ПГНИУ. Протокол № 10 от 31 августа 2026.

Отзыв составил:

Кандидат физико-математических наук

(01.02.05. Механика жидкости, газа и плазмы),

доцент кафедры теоретической физики

Физико-математического института ПГНИУ

14.09.2026.



(Голдобин Денис Сергеевич)

Я, Голдобин Денис Сергеевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.2.392.01, и их дальнейшую обработку, тел. +73422396227, email: denis.goldobin@gmail.com

14.09.2026.



(Голдобин Д.С.)

Доктор физико-математических наук

(05.13.18. Математическое моделирование, численные

методы и комплексы программ), доцент,

директор Физико-математического института ПГНИУ

14.09.2026



(Барулина Марина Александровна)

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Почтовый адрес: 614068, Пермский край, г. Пермь, ул. Бусирева, д. 15

Телефон: +7 (342) 239-64-35

E-mail: info@psu.ru

Официальный сайт организации: <https://www.psu.ru>



Голдобин Д.С.
Барулина М.А.
14.09.2026