

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.273.08,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БАЛТИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ И. КАНТА»,  
МИНОБРНАУКИ РОССИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 25.12.2023 № 3

О присуждении Куцу Александру Константиновичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Влияние неоднозначности визуальной информации на процессы ее обработки в нейронной сети головного мозга» по специальностям 1.5.2 – Биофизика и 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 23 октября 2023 г. (протокол № 2) диссертационным советом 24.2.273.08, созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский федеральный университет имени И. Канта» (ФГАОУ ВО «БФУ имени И. Канта»), Минобрнауки России, 236041, Россия, г. Калининград, ул. Александра Невского, 14, приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета от 23.05.2023 № 1120-нк.

Соискатель Куц Александр Константинович, 1995 года рождения, в 2023 году окончил аспирантуру ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь» по направлению подготовки 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника», работает младшим научным сотрудником Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»).

Диссертация выполнена в Балтийском центре нейротехнологий и искусственного интеллекта, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта».

Научные руководители – доктор физико-математических наук Максименко Владимир Александрович, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта», Балтийский центр нейротехнологий и искусственного интеллекта, ведущий научный сотрудник; доктор физико-математических наук, профессор Храмов Александр Евгеньевич, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта», Балтийский центр нейротехнологий и искусственного интеллекта, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

1. Постников Евгений Борисович, доктор физико-математических наук (05.13.18), доцент, ФГБОУ ВО «Курский государственный университет» (г. Курск), профессор кафедры физики и нанотехнологий, заведующий отделом теоретической физики научно-исследовательского центра физики конденсированного состояния;
2. Захаров Денис Геннадьевич, кандидат физико-математических наук (01.04.03), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»» (г. Москва), ведущий научный сотрудник Центра нейроэкономики и когнитивных исследований Института когнитивных нейронаук,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов) в своем положительном заключении, подписанном Короновским Алексеем Александровичем, д.ф.-м.н. (01.04.03), заведующим кафедрой физики открытых систем института физики, указал, что диссертация Куца А.К. является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную в области математического моделирования биофизических процессов тему, а результаты работы могут найти применение в научно-исследовательских институтах, занимающихся изучением биофизических процессов в головном мозге, созданием технологий компьютерной обработки нейрофизиологической активности мозга, а также их приложений в биомедицине и нейрофизиологии. Диссертация полностью соответствует специальностям 1.5.2 – «Биофизика» и 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы и оформлен в соответствии с предъявляемыми требованиями. Работа отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Куц Александр Константинович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.5.2 – «Биофизика» и 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 31 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации опубликована 31 работа общим объемом 18.3 п.л. (авторский вклад 6.2 п.л.), из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 7 работ. Список публикаций также включает 13 работ в сборниках трудов всероссийских и международных конференций, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, и 11 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Куч А. К.**, Grubov V. V., Maksimenko V. A., Shusharina N. N., Pisarchik A. N., Hramov A. E. Sensor-level wavelet analysis reveals eeg biomarkers of perceptual decision-making // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – No. 7. – P. 2461.
2. Maksimenko V., **Куч А.**, Frolov N., Kurkin S., Hramov A. Effect of repetition on the behavioral and neuronal responses to ambiguous Necker cube images // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – No. 1. – P. 3454.
3. **Куч А. К.**, Korchagin S. A., Maksimenko V. A., Shusharina N. N., Hramov A. E. Combining statistical analysis and machine learning for eeg scalp topograms classification // *Frontiers in Systems Neuroscience*. – 2021. – Vol. 15. – P. 716897.
4. **Куч А. К.**, Kurkin S. A., Maksimenko V. A., Pisarchik A. N., Hramov A. E. Monitoring brain state and behavioral performance during repetitive visual stimulation // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. – No. 23. – P. 11544.
5. **Куч А.**, Maksimenko V., Savosenkov A., Grigorev N., Grubov V., Badarin A., Gordleeva S., Kazantsev V., Hramov A. Studying perceptual bias in favor of the from-above Necker cube perspective in a goal-directed behavior // *Frontiers in Psychology*. – 2023. – Vol. 14.

На автореферат поступило 6 положительных отзывов: из Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук от Пономаренко В.И., д.ф.-м.н. (01.04.03); из Мадридского политехнического университета (г. Мадрид, Испания) от Писарчика А.Н., к.ф.-м.н. (01.04.21); из ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» от Захарова А.В., к.м.н. (14.01.11); из Университета Лафборо (г. Лафборо, Великобритания) от Баланова А.Г., к.ф.-м.н. (01.04.03); из ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» от Михайлова А.Н., к.ф.-м.н. (05.27.01); из ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» от Смирнова В.А., к.т.н. (05.27.01).

В отзывах на автореферат сделаны замечания: об отсутствии обсуждения возможности использования обнаруженных биофизических эффектов для ранней диагностики неврологических заболеваний; об отсутствии сопоставления полученных в первой главе результатов с известной научной литературой; визуализации полученных во второй главе результатов; о недостаточно детальном описании методов анализа сигналов ЭЭГ, таких, как вейвлет-преобразование и статистический анализ; о представлении рисунка 4, который выглядит перегруженным для автореферата, и содержит обозначения, не обсуждаемые напрямую в тексте; также содержатся замечания редакционного характера.

Выбор официальных оппонентов обосновывается близким соответствием проводимых ими исследований теме диссертации, их высокой квалификацией, связанной с изучением и математическим моделированием динамики нейронной сети головного мозга, позволяющей оценить научную и практическую значимость диссертационной работы, широкой известностью и признанными достижениями среди специалистов. Выбор ведущей организации обосновывается её высоким авторитетом среди научно-исследовательских организаций, эффективно работающих над решением актуальных задач биофизики. Выбор официальных оппонентов и ведущей организации удовле-

творяет критериям, сформулированным в пп.22 и 24 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. №842.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**установлено**, что увеличение неоднозначности визуальной информации индуцирует повышение мощности сигналов ЭЭГ, регистрируемых в лобной области, при этом обработка визуальной информации с низкой неоднозначностью вызывает высокую мощность ЭЭГ в затылочной области;

**предложены:**

экспериментальная парадигма, позволяющая исследовать влияние восходящих и нисходящих потоков обработки визуальной информации;

численный алгоритм для формирования набора признаков, характеризующих обработку визуальной сенсорной информации в условиях неоднозначности;

**обнаружено**, что во время длительного восприятия визуальной информации наблюдается эффект тренировки, который заключается в уменьшении времени принятия решения частоты ошибочных интерпретаций визуальных стимулов, а также сопровождается повышением мощности ЭЭГ в альфа-диапазоне в правой височной области головного мозга;

**выявлено**, что на начальных этапах обработки головным мозгом неоднозначной визуальной информации активируется выборочное внимание для устранения неоднозначности информации, что сопровождается повышением мощности ЭЭГ в бета-диапазоне во фронтальной области головного мозга;

**разработан** комплекс, состоящий из методик, математической модели, а также компьютерных программ, для обработки электроэнцефалографических сигналов, полученных в ходе экспериментов по восприятию визуальной информации, с целью формирования пространства признаков для машинного алгоритма классификации состояний мозга, связанных с обработкой визуальной информации в условиях высокой и низкой неоднозначности.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

**изложены** принципы изменения стратегии обработки головным мозгом визуальной информации при увеличении уровня неоднозначности;

**раскрыты** физические процессы важнейших биологических процессов, характеризующих адаптацию нейронной сети головного мозга к восприятию визуальной информации в условиях неоднозначности;

**изучены** биофизические механизмы, описывающие процессы устранения головным мозгом неоднозначности визуальной информации;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использован** комплекс современных методов нелинейной динамики, метод вейвлет-преобразования сигналов ЭЭГ, методы статистического анализа, методы машинного обучения;

**доказана** возможность использования сверточной нейронной сети для классификации состояний головного мозга с высокой устойчивостью к вариабельности данных между испытуемыми.

**разработана** математическая модель на основе сверточной нейронной сети, обучаемая с использованием биологически интерпретируемого набора признаков, применение которой позволяет повысить обобщающую способность классификаторов на основе машинного обучения и их устойчивость к вариабельности данных между испытуемыми.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**определена** возможность диагностики состояний головного мозга во время восприятия визуальной сенсорной информации;

**представлены** рекомендации по формированию интерпретируемого метода классификации состояний головного мозга;

**разработаны и внедрены** комплексы программ, реализующие разработанное математическое и алгоритмическое обеспечение (получено 11 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ);

**исследования выполнялись** при поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-404.2021.5, грантов РНФ 23-42-00108, 23-71-30010.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что

**идея базируется** на современных теоретических представлениях и экспериментальных результатах в области исследования нейронной активности головного мозга во время обработки сенсорной информации;

**использованы** математические методы и подходы численного моделирования, которые апробированы и хорошо себя зарекомендовали при проведении научных исследований в области биофизики и математического моделирования;

**установлено** качественное и количественное соответствие полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными (частотная и пространственная локализация выявленных биомаркеров), опубликованными в отечественных и зарубежных высокорейтинговых научных изданиях;

**использовано** сертифицированное оборудование для получения сигналов электрической активности головного мозга, а также методы обработки и анализа экспериментальных данных, широко используемые при анализе нейрофизиологических процессов.

**Личный вклад соискателя.** Все представленные в диссертации результаты получены лично автором: выбор методик решения задач, разработка программного обеспечения для экспериментальных исследований, предварительной обработки и анализа нейрофизиологических данных, графическая обработка, реализация численного алгоритма. Постановка задач, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научными руководителями и соавторами работ.

Полученные в диссертационной работе результаты расширяют существующие представления об обработке головным мозгом внешней сенсорной информации, в том числе в условиях высокой неоднозначности поступающей визуальной информации, а предложенный численный алгоритм формирования пространства признаков позволяет разработать математическую модель, основанную на методах интерпретируемого машинного обучения, обладающую высокой точностью классификации и устойчивостью

к вариабельности данных между испытуемыми. Также результаты работы рекомендуются к использованию в научных организациях, занимающихся изучением биофизических процессов в головном мозге при восприятии и обработке сенсорной информации, созданием технологий компьютерной обработки нейрофизиологической активности мозга, а также их приложений в биомедицине и нейрофизиологии: в Федеральном центре мозга и нейротехнологий, г. Москва; в Институте высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва; в научно-исследовательском институте нейронаук СамГМУ, г. Самара, а также в высших учебных заведениях, ведущих подготовку специалистов по направлениям 1.5.2 – биофизика и 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Кубанский государственный университет, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Тульский государственный университет, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Московский физико-технический институт (национально-исследовательский университет) и др.).

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

- 1) о сопоставлении полученных в первой главе результатов с известной научной литературой;
- 2) об обосновании выбора вейвлета Морле в качестве материнской вейвлет-функции;
- 3) о пояснении выбора различных методов удаления артефактов в разных главах работы;
- 4) об обосновании выбора сверточной нейронной сети в качестве математической модели;
- 5) о необходимости проведения оценки разности выходной частоты вейвлет-преобразованного сигнала и частоты исходного сигнала;
- 6) о возможности добавления в экспериментальную парадигму характеристики угла зрения, которое занимает изображение для наблюдателя.

Соискатель Куц А.К. ответил на замечания, содержащиеся в отзывах ведущей организации и официальных оппонентов, и на заданные ему в ходе заседания вопросы и дал необходимые пояснения: 1) пояснил, что полученные результаты согласуются с теорией о нисходящих и восходящих потоках обработки визуальной информации в нейронной сети головного мозга; 2) пояснил, что выбор в качестве материнской вейвлет-функции вейвлета Морле осуществлен на основе анализа научной литературы, посвященной сравнению различных вейвлет-функцию применительно к обработке нейрофизиологических сигналов; 3) пояснил, что во второй главе выбор метода эмпирической декомпозиции мод для удаления артефактов обоснован тем, что функция внутренней моды может быть идентифицирована как один из частотных диапазонов, используемых в нейрофизиологии, что является преимуществом при анализе альфа- и бета-ритмов головного мозга; 4) пояснил, что выбор сверточной нейронной сети в ка-

честве математической модели обоснован схожестью ее работы с принципом работы зрительной коры головного мозга; 5) пояснил, что для корректной оценки соотношений между амплитудами колебательных процессов во время вейвлет-преобразования проводилась нормировка; 6) пояснил, что добавление характеристики угла зрения, которое занимает изображение для наблюдателя, нарушает принцип бистабильности изображения, используемого в экспериментальной парадигме.

Диссертация Куца А.К. содержит решение актуальной научной задачи в области *биофизики*, заключающейся в изучении нейрофизиологических особенностей восприятия головным мозгом визуальной информации при увеличении уровня неоднозначности; актуальной научной задачи в области *математического моделирования, численных методов и комплексов программ*, заключающейся в разработке математической модели на основе сверточной нейронной сети, классифицирующей состояния головного мозга во время обработки визуальной информации, численного алгоритма и комплекса программ для обработки и анализа нейрофизиологических данных. Содержание диссертации удовлетворяет требованиям пп. 9–11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 25 декабря 2023 года диссертационный совет принял решение присудить Куцу Александру Константиновичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальностям 1.5.2 – Биофизика и 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 10 человек (8 человек находились в месте проведения заседания, 2 человека участвовали в заседании совета в удаленном интерактивном режиме), из них 8 докторов по специальности 1.5.2 – Биофизика, из 11 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 3 человека (1 человек находились в месте проведения заседания, 2 человека участвовали в заседании совета в удаленном интерактивном режиме) по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, проголосовали: за – 13, против – НЕТ, воздержавшихся – НЕТ.

Председательствующий,  
заместитель председателя  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета

«25» декабря 2023 г.

  
  
Куркин Семен Андреевич  
  
Андреев Андрей Викторович