

«УТВЕРЖДАЮ»

И. о. ректора ФГАОУ ВО
«Балтийский федеральный
университет им. Иммануила Канта»



Демидов Максим Викторович

«16» июня 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

«Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (ФГАОУ ВО
«БФУ им. И. Канта»)

по диссертации Антипова Владимира Михайловича «Биофизические механизмы усвоения информации в головном мозге человека: анализ мультимодальных сигналов нейронной и глазодвигательной активности» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.5.2. — «Биофизика» и 1.3.4. – «Радиофизика», выполненной в Балтийском центре нейротехнологий и искусственного интеллекта ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта».

Тема диссертации утверждена на заседании экспертного совета ОНК «Институт высоких технологий» по группам научных специальностей 1.2. Компьютерные науки, 2.3. Информационные науки, научным специальностям 1.5.2 Биофизика, 5.12.4 Когнитивное моделирование от 31 января 2025 г., протокол №4.

Соискатель Антипов Владимир Михайлович окончил магистратуру Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ) по направлению 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» в 2019 г.

Антипов В.М. работал в Юго-Западном государственном университете (ЮЗГУ) в должности инженера кафедры механики, мехатроники и

робототехники с 2017 г. по 2019 г., в должности младшего инженера-исследователя лаборатории «Мехатроники, управления и прототипирования», АНО ВО «Университет Иннополис» с 2019 г. по 2022 г., в должности младшего научного сотрудника лаборатории нейронауки и когнитивных технологий, АНО ВО «Университет Иннополис» с 2021 г. по 2022 г.

С 2022 г. по настоящее время Антипов В.М. работает в должности младшего научного сотрудника Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, БФУ им. И. Канта.

Диплом об окончании магистратуры № 104624 0938707 выдан 08.07.2019 Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Юго-Западный государственный университет». Справка о сдачи кандидатского экзамена по специальной дисциплине по научной специальности 1.5.2 Биофизика (физико-математические науки) № 3602 от 18.11.2024 г. выдана Федеральным государственным автономным образовательным учреждением «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта». Справка о сдаче кандидатского экзамена по иностранному языку, истории и философии науки и специальной дисциплине по научной специальности 1.3.4 Радиофизика № 029/А от 31.03.2025 г. выдана Федеральным государственным автономным образовательным учреждением «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского».

Научные руководители – кандидат физико-математических наук, Бадарин Артем Александрович, старший научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта и член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор Храмов Александр Евгеньевич, главный научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, утверждены на заседании экспертного совета ОНК «Институт высоких технологий» по группам научных специальностей 1.2. Компьютерные науки, 2.3. Информационные науки, научным специальностям 1.5.2 Биофизика, 5.12.4 Когнитивное моделирование от 31 января 2025 г., протокол №4

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании экспертного совета ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» с приглашением специалистов по профилю диссертации из ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского». На заседании присутствовали:

1. Юров А.В., доктор физико-математических наук, профессор, руководитель ОНК «Институт высоких технологий» БФУ им. И.Канта;
2. Гордлеева С.Ю., доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры нейротехнологий Института биологии и биомедицины, директор НИИ Нейронаук ННГУ им. Н.И. Лобачевского;
3. Зинин Л.В., доктор физико-математических наук, заведующий Лабораторией математического моделирования физики плазмы, профессор ОНК «Институт высоких технологий» БФУ им. И.Канта;
4. Караваев А.С., доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ им. Н.Г. Чернышевского;
5. Куркин С.А., доктор физико-математических наук, доцент, г.н.с. Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта БФУ им. И.Канта;
6. Максименко В.А., доктор физико-математических наук, в.н.с Центра нейроморфных вычислений АНО ВО «Университет НЕЙМАРК»;
7. Храмов А.Е., член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, г.н.с. Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта БФУ им. И.Канта;
8. Андреев А.В., кандидат физико-математических наук, с.н.с. Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта БФУ им. И.Канта;
9. Бадарин А.А., кандидат физико-математических наук, с.н.с. Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта БФУ им. И.Канта;
10. Грубов В.В., кандидат физико-математических наук, с.н.с. Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта БФУ им. И.Канта;

Рецензенты диссертации:

1. Караваев А.С., доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов;
2. Максименко В.А., доктор физико-математических наук, в.н.с Центра нейроморфных вычислений АНО ВО «Университет НЕЙМАРК», г. Нижний Новгород.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение.

Заключение

Диссертация Антипова Владимира Михайловича посвящена разработке новых радиофизических методов обработки мультимодальных физиологических данных и выявлению электроэнцефалографических, гемодинамических и

электроокулографических биомаркеров, характеризующих биофизические механизмы эффективного усвоения информации с учётом психофизиологического состояния человека, включая уровень усталости и внимания.

Соответствие специальности. Содержание диссертации соответствует специальности 1.5.2 «Биофизика» (физико-математические науки) и 1.3.4 «Радиофизика» (физико-математические науки), удовлетворяя паспортам специальностей.

Научная новизна результатов диссертации Антипова В.М. заключается в следующем:

- Разработан новый метод восстановления ЭЭГ сигналов, искажённых в результате зашумления и/или наличия артефактов различной природы на основе применения модели резервуарных вычислений.

- Разработан новый метод детектирования глазодвигательных характеристик по окулографическому сигналу в условиях повышенного уровня шума, на основе кластеризации методом k-средних в скользящем временном окне с добавлением задержек и последующей аппроксимацией с использованием параметрической модели саккады.

- Впервые выявлены особенности структуры сигналов ЭЭГ, характеризующие процессы усвоения новой информации, поступающей от различных сенсорных каналов, включая повышение мощности тета-, альфа- и бета-ритмов в лобной, правой височной и теменной областях после предъявления стимульной информации, что отражает процессы консолидации памяти.

- Выявлены компенсаторные механизмы адаптации кортикальной сети головного мозга при продолжительной когнитивной нагрузке. С использованием функциональной ближней инфракрасной спектроскопии впервые показано, что сохранение эффективности выполнения задачи обеспечивается за счёт функциональной перестройки лобно-теменной сети мозга. Установлена зависимость компенсаторного усилия от сложности задачи в контексте работы кратковременной памяти.

Практическая значимость заключается в возможности использования полученных в диссертационной работе результатов для ранней диагностики когнитивных нарушений и разработки персонализированных методик обучения. Разработанные методы обработки мультимодальных нейрофизиологических сигналов могут применяться для создания систем нейромониторинга, определяющих эффективность усвоения информации и уровень когнитивной усталости. Выявленные биомаркеры успешного запоминания и механизмы компенсации усталости представляют ценность для образовательных технологий, позволяя оптимизировать процесс обучения с учетом индивидуальных особенностей когнитивной обработки информации. Разработанные методы анализа электроэнцефалографических и окулографических сигналов могут быть внедрены

в практические исследования для повышения точности обработки нейрофизиологических сигналов. Кроме того, понимание механизмов адаптации мозга при продолжительной когнитивной нагрузке имеет значение для разработки программ профилактики когнитивного утомления в профессиях, требующих длительной концентрации внимания, таких как операторы сложных технических систем, диспетчеры или медицинские работники.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Разработан метод восстановления зашумленных электроэнцефалографических сигналов на основе резервуарных вычислений, позволяющий повысить качество реконструкции сигнала по сравнению с широко используемыми подходами, основанными на сферической сплайн-интерполяции, снижая ошибку реконструкции в среднем в 3.2 раза.

2. Предложен устойчивый к шуму метод детектирования характеристик окулограммы, основанный на кластеризации временного ряда окулографического сигнала методом k-средних с добавлением задержек в скользящем временном окне и последующей параметрической аппроксимацией саккад. Предложенный подход позволил обеспечить долю ложно найденных саккад не более 5% от числа правильно детектируемых саккад в диапазоне отношения сигнал/шум от 3 до 30 дБ.

3. Успешное усвоение новой информации, представленной в виде текста, звука и их комбинации, характеризуется совместным повышением спектральной мощности электроэнцефалограммы в период отдыха после ее предъявления в диапазонах тета (4.5-5.5 Гц) - преимущественно в лобной, альфа (9.5-11.5 Гц) - в правой височной и бета (14.5-16 Гц) - в теменной зонах мозга, отражая процесс консолидации памяти, подавления нерелевантных звуковых сигналов и механизм нисходящего контроля обработки информации соответственно.

4. Влияние общего уровня усталости на выполнение заданий на кратковременную память зависит от их сложности. При выполнении простых заданий (запоминание 2-3 букв) рост усталости сопровождается увеличением обратного индекса эффективности ($r=0.44$, $p=0.0035$) и ослаблением функциональной связности в теменной ($r=-0.47$, $p=0.0016$) и между лобной и теменной областями ($r=-0.38$, $p=0.0017$), что свидетельствует о снижении активности нейронных сетей, ответственных за поддержание направленного внимания, и ослаблении контроля за выполнением задачи. В отличие от этого, при выполнении сложных заданий (запоминание 6-7 букв) влияние усталости на эффективность выполнения отсутствует, а обратный индекс эффективности определяется уровнем связности в лобной области ($r = -0.31$, $p = 0.041$), что отражает мобилизацию когнитивных ресурсов за счёт нисходящей регуляции внимания, обеспечивающей сохранение эффективности в условиях усталости.

Личный вклад. Все результаты, представленные в данной диссертационной работе, получены лично автором. Автором производились экспериментальные исследования, разработка программного обеспечения, предварительная обработка и анализ мультимодальных нейрофизиологических данных. Постановка задач, обсуждение результатов и их интерпретация проводились совместно с научными руководителями и соавторами опубликованных работ.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методов экспериментального исследования и обработки данных, которые широко применяются и обсуждаются в современной научной литературе. Достоверность результатов, полученных на основе анализа ЭЭГ, фБИКС и окулографии подтверждается их соответствием известным результатам, представленным в высокорейтинговых научных журналах, а также биофизической интерпретацией, согласующейся с современными представлениями о механизмах нейронной активности. Выводы, представленные в диссертации, основаны на статистическом анализе с указанием параметров тестов. Надежность разработанных алгоритмов обработки мультимодальных данных подтверждается тестированием их точности и устойчивости к шуму как на модельных, так и на экспериментальных данных.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены докладами на следующих всероссийских и международных научных мероприятиях: V, VI, VIII Scientific School «Dynamics of Complex Networks and their Applications» (DCNA'2021, Калининград, 2021; DCNA'2022, Калининград, 2022; DCNA'2024, Калининград, 2024), XXXV, XXXIV, XXXIII Всероссийская Школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени профессора А.П. Сухорукова (Москва, 2024; Москва, 2023; Москва, 2022), XXV Annual Conference Saratov Fall Meeting 2021; and IX Symposium on Optics and Biophotonics (Саратов, 2021). Полученные в диссертационной работе результаты были использованы при выполнении научных задач в рамках следующих НИР: грантов Российского научного фонда № 23-71-30010, № 23-72-10016, а также грантов Президента Российской Федерации № НШ-589.2022.1.2, № МД-2824.2022.1.2, № МК-2142.2022.1.2.

Научные публикации. Основное содержание и результаты диссертации отражены в 15 публикации автора, включая 9 статей в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science и входящих в перечень ВАК, 7 из которых опубликованы в журналах категории К1, 6 статей в сборниках трудов конференций, индексируемых в Scopus, 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

*Публикации в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных
Web of Science и/или Scopus*

1. Antipov V. Dynamics of Oculomotor Patterns During Prolonged Visual Processing // The European Physical Journal Special Topics. – 2025. – С. 1–8. DOI: 10.1140/epjs/s11734-025-01590-3 (журнал K1)
2. Antipov V. M., Badarin A. A. Development of an algorithm for detecting saccadic eye movements based on model approximation // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Т. 89. – №. 3. (журнал K1)
3. Badarin A. A., Antipov V. M., Grubov V. V., Andreev A. V., Pitsik E. N., Kurkin S. A., Hramov A. E. Brain compensatory mechanisms during the prolonged cognitive task: fnirs and eye-tracking study // IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems. – 2024. – Т. 17. – №. 2. – С. 303–314. (журнал K1)
4. Брусинский Н.А., Бадарин А.А., Андреев А.В., Антипов В.М., Куркин С.А. Динамика волновых ритмов головного мозга предсказывает скорость выполнения когнитивных задач // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2024. – Т. 88. – №1. – С. 160-163. (журнал K1)
5. Khorev V., Kiselev A., Badarin A., Antipov V., Drapkina O., Kurkin S., Hramov A. Review on the use of AI-based methods and tools for treating mental conditions and mental rehabilitation // The European Physical Journal Special Topics. – 2024. – С. 1–20. DOI: 10.1140/epjs/s11734-024-01289-x (журнал K1)
6. Grubov V. V., Khramova M. V., Goman S., Badarin A. A., Kurkin S. A., Andrikov D. A., Pitsik E., Antipov V., Petushok E., Brusinskii N., Bukina T., Fedorov A.A., Hramov A.E. Open-loop neuroadaptive system for enhancing student's cognitive abilities in learning // IEEE Access. – 2024. – Т. 12. – С. 49034–49049. (журнал K1)
7. Badarin A., Andreev A., Klinshov V., Antipov V., Hramov A. E. Hidden data recovery using reservoir computing: Adaptive network model and experimental brain signals // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 2024. – Т. 34. – №. 10. – С. 125-128. (журнал K1)
8. Andreev A., Antipov V., Badarin A. Using Reservoir Computing to Predict a Macroscopic Signal // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Т. 87. – №. 10. – С. 1523–1527.
9. Брусинский Н., Бадарин А., Антипов В. М., Куркин С. А., Храмов А. Е. Анализ когнитивной нагрузки в задаче Стернберга с использованием окулографии // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2023. – Т. 87. – №. 1. – С. 125-128.

1. Brusinskii N., Antipov V., Badarin A. Detection of Eye Movement Characteristics Using Reservoir Computing in High-Noise Environments // 8th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – 2024. – С. 36–38.
2. Antipov V. Identification of Mechanisms and Biomarkers of Learning Efficiency Based on Multimodal Data // 8th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – 2024. – С. 16–18.
3. Piljugin O., Antipov V. The Relationship Between IQ Level and Functional Brain Network Centrality During Cognitive Activity in Children // 8th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – 2024. – С. 187–189.
4. Antipov V. Detecting fatigue indicators from electroencephalogram data during prolonged cognitive load // 7th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – 2023. – С. 295–297.
5. Antipov V., Badarin A., Grubov V. Investigation of brain activity characteristics during working memory activation for multimodal stimuli // 6th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – 2022. – С. 24–26.
6. Badarin A., Antipov V., Grubov V. V., Kurkin S. Changing functional connectivity during solving cognitive tasks: fnirs study // Proc. SPIE. – 2022. – Т. 12194. – С. 121940L.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

- 1) Антипов В. М., Бадарин А. А., Грубов В. В., Максименко В. А., Куркин С. А. Программный модуль предъявления мультимодальных стимулов “MMStim”: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667498, 2023.
- 2) Антипов В. М., Бадарин А. А. Программный модуль для визуальной стимуляции испытуемых в процессе проведения нейрофизиологического эксперимента, основанного на парадигме Стернберга: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663524, 2022.
- 3) Антипов В. М., Бадарин А. А. Программное обеспечение для беспроводной синхронизации измерительных устройств в нейрофизиологических экспериментах: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680736, 2021.

Общая оценка диссертации. Диссертация Антипова Владимира Михайловича «Биофизические механизмы усвоения информации в головном мозге человека: анализ мультимодальных сигналов нейронной и глазодвигательной активности» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

