

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 19.09.2025 № 15

О присуждении Антипову Владимиру Михайловичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Биофизические механизмы усвоения информации в головном мозге человека: анализ мультимодальных сигналов нейронной и глазодвигательной активности» по специальностям 1.5.2 – Биофизика и 1.3.4 – Радиофизика принята к защите 07 июня 2025 г. (протокол № 14) 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 Антипов Владимир Михайлович, 1995 года рождения, в 2019 году окончил магистратуру Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ) с присвоением квалификации «Магистр» по направлению подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника», работает младшим научным сотрудником в Балтийском центре нейротехнологий и искусственного интеллекта, БФУ им. И. Канта.

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

Научные руководители – кандидат физико-математических наук, Бадарин Артем Александрович, старший научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта; член-корреспондент РАН, профессор, доктор физико-математических наук Храмов Александр Евгеньевич, главный научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта.

Официальные оппоненты:

1. Пономаренко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, ведущий научный сотрудник, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН;
2. Мартынова Ольга Владимировна, кандидат биологических наук (03.03.06; 19.00.02), заместитель директора по научной работе, ФГБУН «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН»,

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, указала, что диссертация Антипова В.М. является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную тему на стыке биофизики и радиофизики, а результаты работы вносят существенный вклад в понимание биофизических механизмов усвоения информации и развивают методологию анализа мультимодальных нейрофизиологических сигналов. Выявленные закономерности открывают новые возможности для объективной оценки когнитивных процессов и создания адаптивных систем обучения. Предложенные методы и алгоритмы могут найти применение в научно-исследовательских институтах, подразделениях Российской академии наук, а также могут быть использованы в исследовательских лабораториях и медицинских учреждениях для анализа нейрофизиологических данных. Диссертация полностью соответствует специальностям 1.5.2 – «Биофизика» и 1.3.4 – «Радиофизика». 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, Антипов Владимир Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.5.2 – «Биофизика» и 1.3.4 – «Радиофизика».

Соискатель имеет 15 опубликованных научных работ по теме диссертации общим объемом 12.7 п.л. (авторский вклад 3.9 п.л.), 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. Список публикаций также включает 6 работ в сборниках трудов всероссийских и международных конференций, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, и 3 свидетельства 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. **Antipov V.** Dynamics of Oculomotor Patterns During Prolonged Visual Processing // The European Physical Journal Special Topics. – 2025. 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. 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 **К1**)

На автореферат поступило 7 положительных отзывов: из ФГБУН Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук от Галина Р.Р., к.т.н. (2.5.4); из ФГАОУ ВО Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) от Кастальского И.А., к.ф.-м.н. (01.04.03); из ФГБОУ ВО Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского от Павлова А.Н., д.ф.-м.н. (01.04.03) и Ишбулатова Ю.М., к.ф.-м.н. (01.04.03, 03.01.02); из ФГБУН Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии Наук от Сергеева А.П., к.ф.-м.н. (03.00.16); из ФГАОУ ВО Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского от Иванченко М.В., д.ф.-м.н. (01.04.03); из ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» от Захарова Д.Г., к.ф.-м.н. (01.04.03).

В отзывах на автореферат сделаны замечания: о необходимости обсуждения возможности обработки данных окулографии с помощью разработанных методов в реальном времени на портативных устройствах; о недостаточно подробном описании индивидуальных различий между испытуемыми и их влияния на выявленные закономерности; об отсутствии рассмотрения возможности комбинирования резервуарных вычислений с другими современными методами (трансформеры, графовые нейронные сети) для восстановления ЭЭГ-сигналов; об ограниченности временного горизонта экспериментальной парадигмы (тестирование только через день после обучения), без исследования более долгосрочной динамики; о неполном раскрытии критериев формирования стимульного материала и принципов балансировки сложности заданий; об отсутствии детального анализа латентности лямбда-ответа и ее модуляции в зависимости от типа предъявляемой информации; о неединообразном представлении точности дробных значений в работе; о деталях процедуры обучения резервуара и отсутствии описания критериев отбора испытуемых. Часть замечаний связана с ограниченным объемом автореферата, и более подробные ответы на них содержатся в тексте диссертации.

Выбор официальных оппонентов обосновывается близким соответствием проводимых ими исследований теме диссертации, их высокой квалификацией, связанной с радиофизическими методами анализа нейрофизиологических сигналов, исследованием биофизических механизмов когнитивных процессов и применением методов машинного обучения для обработки мультимодальных данных мозговой активности, 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 и радиофизики. Выбор официальных оппонентов и ведущей организации удовлетворяет 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 успешное усвоение новой информации, представленной в различных сенсорных модальностях, характеризуется совместным повышением спектральной мощности ЭЭГ в период отдыха после предъявления стимула в тета- (4.5-5.5 Гц), альфа- (9.5-11.5 Гц) и бета- (14.5-16.5 Гц) диапазонах, локализованных соответственно в лобной, правой височной и теменной областях коры головного мозга;

предложены:

метод восстановления зашумленных ЭЭГ сигналов на основе резервуарных вычислений, обеспечивающий снижение ошибки реконструкции в 3.2 раза по сравнению со сферической сплайн-интерполяцией;

метод расширенной кластеризации и модельной аппроксимации для детектирования глазодвигательных характеристик в условиях повышенного уровня шума с долей ложных детекций не более 5%;

обнаружено, что влияние усталости на выполнение заданий на кратковременную память зависит от их сложности: при простых заданиях рост усталости сопровождается увеличением обратного индекса эффективности и ослаблением функциональной связности в теменной и лобно-теменной областях, тогда как при сложных заданиях активируются компенсаторные механизмы в лобной доле, обеспечивающие сохранение эффективности;

выявлено, что биомаркерами эффективного усвоения информации являются: повышенная тета-активность в лобной коре, отражающая процессы консолидации памяти; усиление альфа-ритма в правой височной области, связанное с подавлением нерелевантных звуковых сигналов; увеличение бета-активности в теменной области, характеризующее процессы нисходящего контроля; повышенная амплитуда лямбда-ответа в затылочной области;

разработан комплекс радиофизических методов и экспериментальных парадигм для анализа электроэнцефалографических (ЭЭГ) и электроокулографических (ЭОГ) сигналов и исследования механизмов усвоения новой информации, включающий двухэтапное тестирование долговременной памяти и оценку компенсаторных механизмов рабочей памяти при длительной когнитивной нагрузке с использованием мультимодальной регистрации ЭЭГ, функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия и окулографии.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

разработаны новые радиофизические методы обработки нестационарных физиологических сигналов в условиях помех, основанные на резервуарных вычислениях и расширенной кластеризации, позволяющие существенно повысить качество анализа мультимодальных нейрофизиологических данных;

расширены представления о биофизических механизмах усвоения информации, поступающей от различных сенсорных каналов восприятия, через выявление специфических паттернов осцилляторной активности в тета-, альфа- и бета-диапазонах, характеризующих процессы консолидации памяти;

изложена концепция дифференцированных компенсаторных механизмов адаптации кортикальных сетей к длительной когнитивной нагрузке, зависящих от сложности вы-

полняемой задачи и реализуемых через динамическую перестройку функциональной связности лобно-теменной сети;

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

представлены методы восстановления зашумленных ЭЭГ сигналов и детектирования глазодвигательных характеристик, которые превосходят существующие подходы по точности в 3.2 раза и обеспечивают устойчивую работу в диапазоне отношения сигнал/шум от 3 до 30 дБ;

определено, что для объективной оценки эффективности усвоения информации и уровня когнитивного утомления необходимо комплексное использование выявленных ЭЭГ-биомаркеров (спектральная мощность в специфических частотно-пространственных диапазонах, амплитуда лямбда-ответа) и показателей глазодвигательной активности;

разработан комплекс программ для проведения мультимодальных экспериментальных исследований и обработки нейрофизиологических данных (получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ);

исследования выполнялись при поддержке грантов РНФ № 23-71-30010, № 23-72-10016, грантов Президента РФ № НШ-589.2022.1.2, № МД-2824.2022.1.2, № МК-2142.2022.1.2.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что

идея базируется на фундаментальных принципах биофизики нейронных процессов, теории обработки сигналов, современных методах машинного обучения и актуальных представлениях о механизмах памяти и внимания;

использованы апробированные методы вейвлет-анализа, методы анализа независимых компонент, теории графов, резервуарных вычислений и статистической обработки с непараметрической кластерной коррекцией для множественных сравнений;

установлено соответствие полученных результатов с данными, представленными в высокорейтинговых научных журналах, а разработанные методы протестированы как на модельных системах, так и на экспериментальных данных;

использовано сертифицированное оборудование и программное обеспечение для регистрации нейрофизиологических сигналов, а также валидированные психометрические тесты, широко используемые для контроля функционального состояния испытуемых в нейрофизиологических исследованиях.

Личный вклад соискателя. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором: разработка метода восстановления зашумленных ЭЭГ сигналов на основе резервуарных вычислений, разработка алгоритма для детектирования глазодвигательных характеристик, проектирование и проведение экспериментальных исследований, разработка программного обеспечения для предъявления мультимодальных стимулов и регистрации данных, предварительная обработка и анализ мультимодальных нейрофизиологических данных (ЭЭГ, функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия, окулография), статистический анализ и интерпретация результатов. Постановка задач, обсуждение результатов и их биофизическая интерпретация проводились совместно с научными руководителями и соавторами опубликованных работ.

Полученные в диссертационной работе результаты расширяют существующие представления о биофизических механизмах усвоения и обработки информации в головном

мозге человека, а разработанные радиофизические методы восстановления зашумленных ЭЭГ сигналов и детектирования глазодвигательных характеристик обладают высокой точностью и устойчивостью к помехам, превосходя существующие подходы. Выявленные ЭЭГ-биомаркеры успешного запоминания и компенсаторные механизмы адаптации к когнитивной нагрузке открывают возможности для объективной оценки эффективности образовательных технологий и создания адаптивных обучающих систем. Предложенные методы мультимодального анализа нейрофизиологических данных делают возможным раннюю диагностику когнитивных нарушений и разработку персонализированных методик обучения. Результаты работы могут использоваться при создании систем нейромониторинга когнитивной эффективности, методов профилактики когнитивного утомления и рекомендуются к использованию в профильных научных и образовательных учреждениях: в Федеральном центре мозга и нейротехнологий, г. Москва; в Национальном медицинском исследовательском центре терапии и профилактической медицины, 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 1.3.4 – радиофизика (Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Воронежский государственный университет, Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН и др.).

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие замечания и комментарии:

- 1) о возможности применения методов направленной связи, которые могли бы лучше выявить причинно-следственные взаимодействия между областями мозга;
- 2) о влиянии частоты дискретизации ЭОГ на параметры окна и шага алгоритма детектирования саккад;
- 3) о контроле влияния специализации образования (естественно-научная/гуманитарная) на предварительные знания при запоминании фактов;
- 4) об учете влияния количества фиксации и различий в стратегиях чтения между условиями "текст" и "текст+звук" при анализе фиксационно-связанных потенциалов, поскольку звуковое сопровождение могло снижать необходимость детального визуального сканирования текста и, следовательно, приводить к уменьшению количества фиксации;

Соискатель Антипов В.М. 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 исследование функциональной связанности с использованием методов учитывающих направление связей может существенно расширить результаты исследования и будет обязательно рассмотрено в дальнейших исследованиях; 2) пояснил, что окно 200 мс и шаг 20 мс заданы исходя из физиологических характеристик саккад и не зависят от частоты дискретизации: при 250-1000 Гц алгоритм показал устойчивость без изменения параметров, а при экстремальных частотах возможна корректировка (увеличение окна при частоте <200 Гц, уменьшение шага при частоте

