

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, ведущего научного сотрудника Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Пономаренко Владимира Ивановича на диссертационную работу Антипова Владимира Михайловича «Биофизические механизмы усвоения информации в головном мозге человека: анализ мультимодальных сигналов нейронной и глазодвигательной активности», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.5.2 – Биофизика и 1.3.4 – Радиопизика

Диссертационная работа Антипова Владимира Михайловича посвящена решению фундаментальной научной задачи – выявлению биофизических механизмов усвоения информации головным мозгом человека на основе комплексного анализа мультимодальных нейрофизиологических сигналов: глазодвигательной активности, электроэнцефалографии (ЭЭГ) и функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (фБИКС). Данная задача находится на стыке современной биофизики, радиопизики, когнитивной нейронауки и методов обработки сложных сигналов, что определяет её междисциплинарный характер и особую актуальность.

Следует отметить, что современное понимание процессов обработки и усвоения информации в головном мозге всё в большей степени требует не только качественного описания нейрофизиологических феноменов, но и разработки точных количественных методов анализа, способных работать в условиях высокого уровня шума и артефактов, характерных для реальных экспериментальных данных. В этой связи разработка новых радиопизических методов обработки глазодвигательных и ЭЭГ сигналов приобретает критическое значение. Особенно ценно, что автор в своей работе сочетает глубокое понимание биофизической природы исследуемых процессов с применением современных методов анализа сигналов, включая резервуарные вычисления и методы машинного обучения.

Диссертантом предлагается комплексный подход к изучению механизмов усвоения информации, учитывающий как различные сенсорные модальности (зрительную, слуховую и комбинированную), так и влияние психофизиологического состояния человека, включая уровень усталости и внимания. Такой подход позволяет получить целостное представление о биофизических процессах, лежащих в основе когнитивной деятельности.

Учитывая растущие требования к эффективности образовательных технологий и необходимость объективной оценки когнитивных процессов, исследование, направленное на выявление нейрофизиологических биомаркеров успешного усвоения информации, несомненно обладает высокой актуальностью. Важно подчеркнуть, что для выполнения такого рода исследований необходима не только техническая компетенция в области обработки сигналов, но и глубокое понимание нейрофизиологических основ

памяти, внимания и процессов консолидации информации. Считаю, что представленное диссертационное исследование полностью соответствует направлениям подготовки по специальностям 1.5.2 – Биофизика и 1.3.4 – Радиофизика.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 173 страницы, включает 28 иллюстраций и 4 таблицы.

Характеристика содержания работы

Во **введении** сформулированы цель и задачи исследования, обосновывается актуальность исследования, приводятся научная и практическая значимость результатов, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена разработке и апробации радиофизических методов обработки глазодвигательных и ЭЭГ сигналов в условиях повышенного уровня шума. Автор детально анализирует проблему восстановления зашумленных каналов ЭЭГ и предлагает оригинальный метод на основе резервуарных вычислений. На модельных данных адаптивной сети осцилляторов Курамото и реальных ЭЭГ-записях демонстрируется превосходство предложенного метода над традиционными подходами, включая линейную регрессию и сферическую сплайн-интерполяцию. Особое внимание уделено разработке алгоритма для детектирования глазодвигательной активности, что критически важно для точного анализа процессов визуального восприятия информации и мониторинга психофизиологического состояния человека. Данный алгоритм продемонстрировал высокую устойчивость к шуму, обеспечивая долю ложноположительных срабатываний не более 5% от числа правильно детектируемых саккад в диапазоне отношения сигнал/шум от 3 до 30 дБ, что превосходит показатели существующих методов.

Во **второй главе** представлена разработанная автором экспериментальная парадигма для изучения механизмов усвоения информации, поступающей от различных сенсорных каналов. Уникальность подхода заключается в двухэтапном тестировании с интервалом 48 часов, что позволяет исследовать процессы консолидации информации в долговременной памяти. Автор применяет вейвлет-анализ с непараметрической кластерной коррекцией для выявления спектральных характеристик ЭЭГ, ассоциированных с успешным запоминанием. Обнаружено повышение мощности в тета-, альфа- и бета-диапазонах в различных областях коры, что интерпретируется как проявление процессов консолидации памяти, подавления нерелевантной информации и нисходящего контроля. Также исследуется λ -ответ как потенциальный биомаркер эффективности обработки визуальной информации.

В **третьей главе** автор исследует компенсаторные механизмы и адаптацию кортикальных сетей при длительной когнитивной нагрузке. Используя фБИКС и регистрацию движений глаз, автор демонстрирует, как мозг адаптируется к утомлению при выполнении заданий на рабочую память.

Особенно интересны результаты, показывающие дифференцированное влияние усталости в зависимости от сложности задачи: для простых заданий наблюдается прямое негативное влияние утомления, тогда как для сложных активируются компенсаторные механизмы в префронтальной коре. Кроме того, сетевой анализ функциональной связности позволил количественно охарактеризовать изменения в организации лобно-теменной сети.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Положения, выносимые на защиту, вполне обоснованы. Полученные результаты обладают **научной новизной и значимостью**. Наиболее значимыми и интересными с научной точки зрения являются следующие результаты:

- Разработан новый метод восстановления ЭЭГ сигналов на основе резервуарных вычислений, демонстрирующий снижение ошибки реконструкции в среднем в 3.2 раза по сравнению со сферической сплайн-интерполяцией.

- Предложен устойчивый к шуму метод детектирования характеристик окулограммы, обеспечивающий долю ложных срабатываний не более 5% в широком диапазоне отношения сигнал/шум.

- Выявлены специфические паттерны спектральной активности ЭЭГ в тета-, альфа- и бета-диапазонах, характеризующие успешное усвоение информации независимо от модальности её предъявления.

- Обнаружены компенсаторные механизмы адаптации лобно-теменной сети, дифференцированно проявляющиеся в зависимости от сложности когнитивной задачи и уровня утомления.

Полученные результаты обладают высокой **практической значимостью**. Разработанные методы обработки нейрофизиологических сигналов могут применяться для создания систем мониторинга, определяющих эффективность усвоения информации и уровень когнитивной усталости. Выявленные биомаркеры успешного запоминания представляют ценность для образовательных технологий, позволяя оптимизировать процесс обучения с учетом индивидуальных особенностей когнитивной обработки информации. Понимание механизмов адаптации мозга при продолжительной когнитивной нагрузке имеет значение для разработки программ профилактики когнитивного утомления в профессиях, требующих длительной концентрации внимания.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных методов экспериментального исследования и обработки данных, статистическим анализом с указанием параметров тестов, тестированием алгоритмов как на модельных, так и на экспериментальных данных. Результаты согласуются с современными представлениями о механизмах нейронной активности. Диссертация полностью соответствует специальностям 1.5.2 – Биофизика и 1.3.4 – Радиофизика.

Тем не менее, к диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. При анализе функциональной связанности используются только корреляционные методы. Не обсуждается возможность применения методов направленной связи, которые могли бы лучше выявить причинно-следственные взаимодействия между областями мозга.

2. Разработанная модель резервуарных вычислений обучается на коротких временных интервалах (1 минута). В работе недостаточно подробно описано обоснование выбора такой длительности.

3. При разработке метода восстановления ЭЭГ сигналов используется фиксированное число нейронов в резервуаре (100 нейронов). В работе не обсуждается влияние размера резервуара на качество восстановления и вычислительную сложность алгоритма.

4. В экспериментальных исследованиях, представленных во второй и третьей главах, участвовали относительно небольшие выборки испытуемых (26 и 14 человек соответственно) узкого возрастного диапазона (18-30 лет). Это ограничивает возможности обобщения полученных результатов на более широкую популяцию. Было бы ценно в дальнейших исследованиях расширить выборку и включить участников различных возрастных групп, что особенно важно при изучении механизмов усвоения информации и адаптации к когнитивной нагрузке, которые могут существенно изменяться с возрастом.

5. В предложенном алгоритме для детектирования глазодвигательных характеристик используется фиксированный размер скользящего окна 200 мс и шаг 20 мс, которые выбраны эмпирически. При этом не исследовано влияние частоты дискретизации сигнала на оптимальные параметры окна. Учитывая, что в разных экспериментальных установках частота регистрации ЭОГ может варьироваться от 250 до 2000 Гц, было бы полезно представить рекомендации по адаптации параметров алгоритма.

Указанные замечания касаются только представления материала диссертационного исследований и не снижают научной ценности, актуальности и новизны полученных результатов.

Считаю, что диссертационная работа Антипова В.М. представляет собой законченное научное исследование. Работа написана грамотным научным языком, хорошо структурирована и иллюстрирована. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Полученные в диссертационной работе результаты хорошо опубликованы. Имеется 15 научных работ, из них 9 – статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, 6 тезисов в трудах всероссийских и международных конференций, индексируемых в системах цитирования Web of Science и/или Scopus. Кроме того, получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Таким образом, диссертационная работа Антипова В.М. «Биофизические механизмы усвоения информации в головном мозге человека: анализ мультимодальных сигналов нейронной и глазодвигательной активности» удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.5.2 – Биофизика и 1.3.4 – Радиопизика.

Ведущий научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, д.ф.-м.н. (01.04.03 – радиофизика), профессор Пономаренко Владимир Иванович, почтовый адрес: 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38, e-mail: ponomarenkovi@gmail.com, тел: 8(8452) 391255



Пономаренко Владимир Иванович
21.08.2025

Подпись Пономаренко В.И. заверяю: заместитель директора по науке Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, к.ф.-м.н.,



Фатеев Денис Васильевич

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук
E-mail организации: infosbireras@gmail.com
Почтовый адрес организации: 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38
Телефон организации: 8 (8452) 27 24 01