

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата биологических наук, заместителя директора по научной работе ФГБУН Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН Мартыновой Ольги Владимировны 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 – Радиофизика

Актуальность диссертационного исследования

Диссертация Антипова Владимира Михайловича направлена на исследование биофизических механизмов усвоения информации в головном мозге человека с помощью анализа мультимодальных нейрофизиологических сигналов и находится на стыке фундаментальной биофизики и радиофизических методов обработки сигналов. В рамках исследования разрабатываются новые методы обработки электроэнцефалографических (ЭЭГ) и окулографических сигналов в условиях повышенного уровня шума, выявляются нейрофизиологические биомаркеры успешного усвоения информации, поступающей через различные сенсорные каналы восприятия, а также исследуются компенсаторные механизмы кортикальных сетей, обеспечивающие поддержание когнитивной эффективности при длительной нагрузке с использованием данных функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (фБИКС). Научная и практическая значимость работы обусловлена, с одной стороны, вкладом в понимание фундаментальных механизмов когнитивной деятельности мозга, а с другой – возможностью применения разработанных методов для объективной оценки эффективности образовательных технологий и создания адаптивных обучающих систем.

Актуальность исследования связана с необходимостью понимания биофизических основ процессов обработки и усвоения информации, которые определяют эффективность обучения, принятия решений и адаптации человека к окружающей среде. Несмотря на значительные достижения в области когнитивной нейронауки, многие фундаментальные вопросы о механизмах усвоения информации, влиянии психофизиологического состояния человека на эти процессы, а также о компенсаторных механизмах при утомлении остаются открытыми. В таких условиях особую значимость приобретает разработка новых радиофизических методов анализа физиологических сигналов, устойчивых к шуму и артефактам, а также комплексный мультимодальный подход к исследованию

нейрофизиологических процессов. Использование в работе данных окулографии, ЭЭГ и фБИКС позволяет исследовать различные аспекты когнитивной деятельности и их взаимосвязи в процессе усвоения новой информации. Таким образом, диссертационное исследование является актуальным, междисциплинарным и полностью соответствует направлениям подготовки по специальностям 1.5.2 – Биофизика и 1.3.4 – Радиофизика.

Характеристика содержания работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения.

Во введении сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные научные результаты и положения, выносимые на защиту. Обоснована актуальность темы, показано соответствие специальностям. Введение содержит описание структуры диссертации, сведения о практической значимости, апробации результатов и публикациях.

В первой главе рассматривается разработка и апробация радиофизических методов обработки и анализа окулографических и сигналов ЭЭГ в условиях повышенного уровня шума. Представлен метод восстановления зашумленных ЭЭГ сигналов на основе резервуарных вычислений, который демонстрирует существенное превосходство над традиционными подходами, снижая ошибку реконструкции в среднем в 3.2 раза по сравнению со сферической сплайн-интерполяцией. Также разработан устойчивый к шуму алгоритм для детектирования глазодвигательных характеристик по данным электроокулограммы (ЭОГ). Предложенный метод обеспечивает высокую устойчивость к шуму в диапазоне отношения сигнал/шум от 3 до 30 дБ при доле ложных срабатываний менее 5%.

Во второй главе представлена экспериментальная парадигма для изучения механизмов усвоения информации, поступающей от различных сенсорных каналов восприятия. Проведено комплексное исследование с участием 26 испытуемых, включающее двухэтапное тестирование с интервалом 48 часов. Выявлены ЭЭГ-биомаркеры успешного запоминания: повышение спектральной мощности в тета-диапазоне (4.5-5.5 Гц) в лобной области, альфа-диапазоне (9.5-11.5 Гц) в правой височной области и бета-диапазоне (14.5-16 Гц) в теменной области. Установлено, что амплитуда фиксационно-связанного потенциала λ -ответа выше для правильных ответов на этапе тестирования.

В третьей главе исследуются компенсаторные механизмы и адаптация кортикальных сетей головного мозга при длительной когнитивной нагрузке. С использованием фБИКС и регистрации движений глаз изучены механизмы поддержания эффективности выполнения задач на рабочую память в условиях нарастающей усталости. Показано, что при выполнении простых заданий рост усталости приводит к снижению функциональной связности в теменной и лобно-теменной областях, тогда как при выполнении сложных

заданий активируются компенсаторные механизмы в лобной доле, обеспечивающие сохранение эффективности.

В заключении подведены итоги исследования и сформулированы основные научные результаты и выводы работы.

Таким образом, диссертационная работа представляет собой завершённое научное исследование, в котором разработаны новые радиофизические методы анализа нейрофизиологических сигналов и выявлены биофизические механизмы усвоения информации. Автор последовательно решает задачи от разработки методов обработки сигналов до выявления фундаментальных закономерностей когнитивной деятельности мозга. Достоверность выводов подтверждается использованием современных методов анализа, статистической обработкой данных и соответствием результатов современным представлениям о механизмах нейронной активности.

Важным аспектом работы является тщательный подход автора к верификации и апробации полученных результатов. В исследовании выполнен детальный сравнительный анализ предложенных методов с существующими подходами, такими как сферическая сплайн-интерполяция, и доказано их превосходство на модельных и экспериментальных данных. Также необходимо подчеркнуть значительный объём экспериментальных исследований, охватывающих разнообразные условия когнитивной нагрузки и сенсорные модальности, что позволяет уверенно говорить об универсальности разработанных алгоритмов и высокой степени обобщаемости полученных выводов.

Особую ценность представляет комплексный мультимодальный подход к исследованию, объединяющий анализ ЭЭГ, ЭОГ и гемодинамических процессов (фБИКС). Разработка методов восстановления сигналов на основе резервуарных вычислений и устойчивого к шуму алгоритма детектирования саккад представляет существенный методический вклад в область обработки нейрофизиологических данных. Выявленные нейрофизиологические биомаркеры успешного усвоения информации и механизмы компенсации утомления имеют как фундаментальное значение для понимания работы мозга, так и практическую ценность для разработки систем мониторинга и персонализированных образовательных технологий.

Вместе с тем, к диссертации имеются следующие замечания и вопросы:

1. При анализе эффективности методов восстановления сигнала ЭЭГ на сенсорах обоснование практической значимости можно было дополнить указанием на затратность по времени и ресурсам метода резервуарных вычислений (РВ) в сравнении с сферической сплайн-интерполяцией

2. Алгоритм РКМА применялся для определения начала фиксации по сигналу ЭОГ, однако в третьей главе использовалась методика отслеживания движений глаз при помощи айтрекера, которая эффективно справляется с регистрацией начала и продолжительности фиксаций без дополнительной регистрации сигнала ЭОГ. Зачем метод РКМА применялся и в этом исследовании, неясно. При этом, сравнение данных регистрации движений глаз с помощью айтрекера могло существенно дополнить обоснование надежности алгоритма РКМА для определения саккад и фиксаций.

3. В исследовании, описанном во 2 главе, важно было также учитывать наличие специализации образования по естественным или гуманитарным наукам, которое могло повлиять на наличие предварительных знаний фактов, которых надо было запоминать.

4. Также в исследовании, описанном во 2 главе, отсутствует как таковой статистический анализ сравнения субъективных оценок добровольцев по тестам на нагрузку и утомляемость до и после обучения и тестирования, и между днями. В результатах представлены только лепестковые диаграммы.

5. При сравнении связанных с событиями спектральных возмущений (ERSP) достоверные различия были показаны только для периода времени отдыха после каждой пробы (кстати, это русское слово, которое лучше использовать вместо триала –trial). При обсуждении результатов дискутируется, что «Подобная латерализация альфа-активности может отражать процессы избирательного торможения нерелевантной информации и модуляции внимания. В частности, повышенная альфа-активность в правой височной области может быть связана с активным подавлением аудиального фона». Возникают сомнения о релевантности подобных выводов о модуляции внимания и подавления аудиального фона в период отдыха между задачами.

6. Также при обсуждении полученных результатов делается упор на пространственную локализацию выявленных эффектов ERSP, но анализ проводился в пространстве сенсоров, насколько правомерно делать выводы по важности локализации без построения источников?

7. При анализе FRP (fixation related potentials) учитывался ли фактор количества фиксаций, проводилось ли сравнение эпох, по которым усредняли FRP для двух условий (текст и текст + звук)? Если звуковое сопровождение полностью соответствовало тексту разве это не должно было повлиять на уменьшение количества фиксаций при чтении текста, по сравнению с условием, когда добровольцу нужно было читать текст более внимательно?

Тем не менее, указанные замечания носят незначительный характер и не снижают общей положительной оценки диссертационного исследования.

Диссертация Антипова В.М. является завершённым научным исследованием. Работа имеет чёткую структуру, а автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

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 – Радиофизика.

Кандидат биологических наук,
Заместитель директора по научной работе
ФГБУН Институт высшей нервной деятельности
и нейрофизиологии РАН,
Мартынова Ольга Владимировна

« 29» августа 2025 г.

Адрес места работы: 117865, РФ, г. Москва, ул. Бутлерова, 5а

тел.: +7 (495) 334-4291

e-mail: omartynova@ihna.ru

Научная специальность кандидатской диссертации Мартыновой Ольги Владимировны – 03.03.06 – Нейробиология, 19.00.02 - Психофизиология.

Подпись к.б.н. Мартыновой Ольги Владимировны удостоверяю



Подпись т. Мартыновой О.В.
УДОСТОВЕРЯЮ
Зав. катед. ИВНД и НО Кузнецова Т.Н.