

На правах рукописи



Антипов Владимир Михайлович

**БИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ УСВОЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В
ГОЛОВНОМ МОЗГЕ ЧЕЛОВЕКА: АНАЛИЗ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ
СИГНАЛОВ НЕЙРОННОЙ И ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ**

1.5.2 – Биофизика
1.3.4 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Калининград 2025

Работа выполнена в Балтийском центре нейротехнологий и искусственного интеллекта ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта».

Научные руководители:

Бадарин Артем Александрович,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Храмов Александр Евгеньевич,

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Официальные оппоненты:

Пономаренко Владимир Иванович,

доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Мартынова Ольга Владимировна,

кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе, ФГБУН «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Защита диссертации состоится 19 сентября 2025 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.273.08 при ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» по адресу: 236022, г. Калининград, ул. Чернышевского, д. 56, ауд. 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Балтийского федерального университета им. И. Канта (г. Калининград, ул. Университетская, д. 2) и на сайте <https://kantiana.ru/postgraduate/dis-list/antipov-vladimir-mikhaylovich/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Андреев Андрей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы. Способность человека к обработке и усвоению информации является одной из ключевых функций мозга, определяющей эффективность обучения, принятия решений и адаптации к окружающей среде. Эта способность обеспечивается биофизическими процессами, происходящими на разных функциональных уровнях — от активности отдельных нейронов до согласованной работы нейронных сетей мозга. Возрастные и нейродегенеративные изменения нарушают эти процессы¹, что приводит к снижению когнитивной эффективности или расстройству внимания. В связи с этим изучение механизмов, лежащих в основе обработки и усвоения информации, имеет важное значение для понимания функционирования мозга и раннего выявления когнитивных нарушений².

Задачам исследования работы памяти и механизмов усвоения информации посвящено большое количество научных публикаций, в том числе работы К.В. Анохина, П.М. Балабана, R.G.Morris, R.L. Buckner, R. Cabeza и др. В частности, R.G. Morris в одной из своих ключевых работ показал, что гиппокамп активно участвует в понимании и запоминании информации, особенно в условиях, когда требуется интеграция новой информации с уже имеющимися знаниями³. П.М. Балабан в недавнем обзоре проанализировал временные характеристики процессов консолидации и реконсолидации памяти, акцентируя внимание на медленных эпигенетических механизмах, регулирующих экспрессию генов пластичности в нейрональных ансамблях⁴. Эти исследования демонстрируют, что усвоение информации представляет собой многоуровневый процесс, требующий согласованной работы различных компонентов нейронных сетей мозга. Однако, несмотря на значительные достижения в данной области, многие фундаментальные вопросы о механизмах когнитивной деятельности, связанной с усвоением новой информации, остаются открытыми. В частности, до конца не изучены механизмы, обеспечивающие сохранение когнитивной эффективности в условиях утомления, а также нейрофизиологические маркеры, характеризующие успешное усвоение новой информации.

Процесс обработки и усвоения информации является результатом сложного взаимодействия сенсорных систем (в первую очередь зрения и слуха), вовлекающего когнитивные механизмы, отвечающие за восприятие, анализ и сохранение информации. Вместе с тем эффективность работы этих механизмов определяется

¹ Jones A. et al. Potentially modifiable risk factors for dementia and mild cognitive impairment: an umbrella review and meta-analysis // *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*. – 2024. – Т. 53. – №. 2. – С. 91-106.

² Gates N. J. et al. Computerised cognitive training for maintaining cognitive function in cognitively healthy people in midlife // *Cochrane database of systematic reviews*. – 2019. – №. 3.

³ Maguire E.A., Frith C.D., Morris R.G.M. The functional neuroanatomy of comprehension and memory: the importance of prior knowledge // *Brain*. – 1999. – Т. 122. – №. 10. – С. 1839–1850.

⁴ Balaban P.M., Borodina A.A. Memory and time // *Neuroscience and Behavioral Physiology*. – 2025. – Т. 55. – №. 5. – С. 593–599.

психофизиологическим состоянием человека, одним из ключевых факторов которого является уровень утомления. При высокой когнитивной нагрузке усталость накапливается, снижая способность мозга концентрироваться и эффективно обрабатывать информацию, что напрямую сказывается на качестве усвоения знаний. При этом процесс обработки и усвоения информации сопровождается множеством физиологических проявлений, затрагивающих как нейронную активность мозга (включая электрические и гемодинамические характеристики), так и широкий спектр поведенческих реакций: глазодвигательные показатели (фиксации, саккады и др.), параметры выполнения задания (время реакции, точность и др.), а также субъективные оценки состояния (усталость, воспринимаемая нагрузка и др.). Такой многоуровневый характер физиологических проявлений, обуславливает необходимость комплексного анализа, основанного на использовании мультимодальных данных, включая электрические, гемодинамические и окулографические сигналы. Поскольку каждый из этих методов отражает разные аспекты когнитивной активности, их объединение позволяет более полно раскрыть биофизические механизмы, лежащие в основе процессов когнитивной обработки и усвоения информации.

Однако, на практике обработка данных сигналов сопровождается рядом сложностей, например, электроэнцефалографические (ЭЭГ) сигналы, регистрируемые неинвазивно с поверхности головы, сильно подвержены шуму и содержат множество артефактов, электроокулографические (ЭОГ) сигналы подвержены сильному искажению потенциалов из-за движения лицевых мышц. Метод функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (фБИКС) также подвержен артефактам, связанным с движением головы и изменением кровотока, обусловленным дыхательными и сердечными циклами. Данные проблемы требуют применения современных подходов к фильтрации и разработки новых эффективных радиофизических методов анализа и статистической обработки сигналов в условиях помех.

Таким образом, **актуальность** темы диссертационного исследования обусловлена, с одной стороны, необходимостью понимания биофизических механизмов усвоения новой информации, поступающей от различных сенсорных каналов восприятия и влияния психофизиологического состояния человека (в частности, усталости и внимания) на эти механизмы, а с другой — потребностью в разработке новых специализированных радиофизических методов анализа нестационарных физиологических сигналов в условиях помех, а также объединения данных, поступающих из различных источников, в рамках мультимодального анализа. Комплексный анализ мультимодальных сигналов и выявление ЭЭГ-, ЭОГ-,

фБИКС-биомаркеров⁵ эффективности обработки информации в мозге позволит глубже понять процессы, происходящие в головном мозге во время усвоения информации, что, в свою очередь, может внести значительный вклад в развитие методов профилактики когнитивных нарушений, связанных с ухудшением памяти и снижением когнитивной активности.

Учитывая вышесказанное, **целью работы** является разработка новых радиофизических методов обработки мультимодальных данных нейронной и глазодвигательной активности и выявление электроэнцефалографических, гемодинамических и окулографических биомаркеров, характеризующих биофизические механизмы эффективного усвоения информации, с учётом влияния психофизиологического состояния человека, включая уровень усталости и внимания.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Разработка метода восстановления участков временных рядов многоканального ЭЭГ сигнала, искажённых в результате зашумления и/или наличия артефактов различной природы (двигательной, мышечной и др.).

2. Разработка метода детектирования характеристик ЭОГ сигнала, характеризующего глазодвигательную активность во время усвоения новой информации в условиях повышенного уровня инструментального и/или физиологического шума.

3. Разработка экспериментальной парадигмы для изучения механизмов усвоения информации, поступающей от различных сенсорных каналов восприятия (зрительный, слуховой) с учетом влияния психофизиологического состояния испытуемого (уровня внимания и усталости).

4. Выявление мультимодальных биомаркеров, характеризующих нейронную и глазодвигательную активность при обработке и усвоении новой информации, поступающей от различных сенсорных каналов восприятия.

5. Разработка экспериментальной парадигмы для изучения влияния усталости на механизмы усвоения информации в условиях продолжительной когнитивной нагрузки.

6. Анализ адаптационных механизмов в кортикальной сети головного мозга на основе мультимодальных данных, вызванных продолжительной когнитивной нагрузкой при обработке и усвоении информации.

⁵ Под биомаркером в данном случае понимается уникальная совокупность частотных, пространственных и временных особенностей физиологических сигналов (в данной работе ЭЭГ, окулография и фБИКС), характерных для конкретного биофизического процесса

Предметом исследования являются биофизические механизмы усвоения информации в головном мозге человека, обеспечивающие восприятие, обработку и усвоение новой информации.

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.

Научная новизна работы соответствует паспортам специальности 1.5.2 – «Биофизика» и 1.3.4. – «Радиофизика» и заключается в обнаружении характеристик мультимодальной активности головного мозга человека, связанных с биофизическими механизмами обработки информации (пункты 1 и 4 паспорта специальности 1.5.2), а также в разработке новых радиофизических методов анализа и статистической обработки мультимодальных физиологических сигналов (включая ЭЭГ, фБИКС и окулографии) в условиях помех (пункты 2 и 4 паспорта специальности 1.3.4). В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

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

2. 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.

3. 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.

4. 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.

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.

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.

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.

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. Список основных работ автора, отражающих существо диссертационной работы, приведен в конце автореферата.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулирована цель работы, приводится краткое содержание диссертации, описание объекта исследования и методики исследования.

В первой главе диссертационной работы описаны разработанные и апробированные методы обработки и анализа физиологических сигналов ЭЭГ и окулографии в условиях повышенного уровня шума.

Разработан метод, направленный на восстановление зашумленных ЭЭГ сигналов на основе резервуарных вычислений (РВ)⁶. Разработка данного метода обусловлена необходимостью решения проблемы восстановления зашумленных сигналов ЭЭГ, возникающей из-за технических артефактов и физиологических помех при регистрации электрической активности мозга. В отличие от традиционных подходов, основанных на сферической сплайн-интерполяции (ССИ), реализованной в широко используемом пакете MNE для обработки физиологических сигналов⁷, или регрессии, предложенный метод использует модель РВ – особый тип рекуррентных нейронных сетей, где внутренние веса генерируются случайным образом и остаются фиксированными, а обучению подвергается только выходной слой⁸. Благодаря такой архитектуре, метод способен эффективно учитывать нелинейные взаимосвязи в сложных динамических системах, что особенно важно при анализе нейрофизиологических сигналов, где существуют сложные пространственно-временные паттерны активности между различными областями мозга.

Апробация метода проводилась на реальных фоновых ЭЭГ записях. Каждый канал многоканального ЭЭГ сигнала поочерёдно рассматривался как поврежденный, после чего восстанавливался на основе оставшихся каналов. Результаты апробации представлены на рисунке 1. Анализ показал, что использование РВ значительно превосходит метод ССИ по точности восстановления ЭЭГ-сигналов. На рис. 1А представлено среднее значение и стандартное отклонение ошибки (ε) восстановления для подходов РВ и ССИ. Ошибка ε рассчитывалась как:

$$\varepsilon(Y^{rec}, Y) = \frac{\sum_i (Y_i^{rec} - Y_i)^2}{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

где Y^{rec} – восстановленный сигнал, Y – исходный сигнал. Рисунок 1Б показывает исходный сигнал для канала Р8 теменной доли (серая линия) и восстановленные

⁶ Tanaka G. et al. Recent advances in physical reservoir computing: A review // Neural Networks. – 2019. – Т. 115. – С. 100-123.

⁷ Gramfort A. et al. MEG and EEG data analysis with MNE-Python // Frontiers in Neuroscience. – 2013. – Т. 7. – №. 267. – С. 1–13.

⁸ Yan M. et al. Emerging opportunities and challenges for the future of reservoir computing // Nature Communications. – 2024. – Т. 15. – №. 1. – С. 2056.

сигналы, полученные методами РВ (зеленая линия) и стандартной интерполяции ССИ (оранжевая линия).

Можно заметить, что сигнал, реконструированный с помощью РВ, ближе к исходному сигналу, чем сигналы, восстановленные с использованием других методов. Кроме того, пространственный анализ ошибок выявил, что преимущество РВ особенно заметно в лобной и центральной областях коры, тогда как в затылочной зоне различия между методами менее выражены (см. рис. 1В).

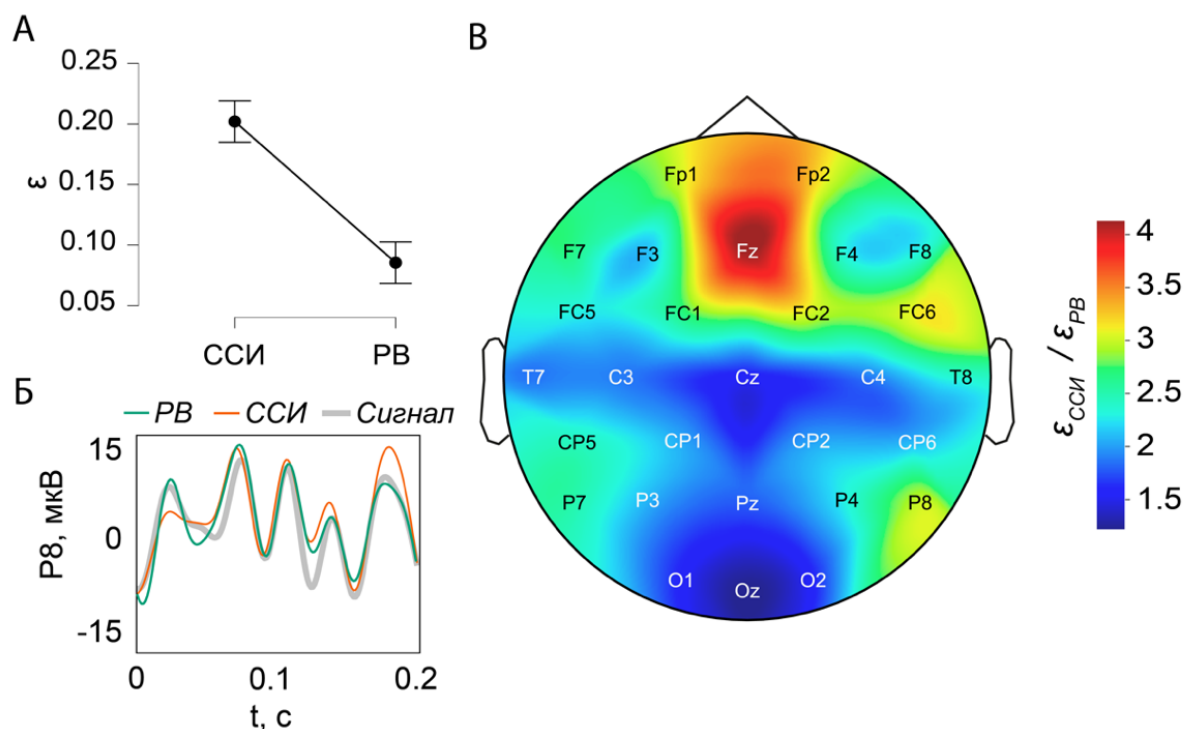


Рисунок 1. Результаты реконструкции каналов ЭЭГ с использованием метода РВ, а также стандартного подхода – ССИ, реализованного в пакете MNE. А) среднее значение и стандартное отклонение ошибки восстановления для подходов РВ и ССИ. Б) временная зависимость ошибки восстановления. Серая кривая — пример исходного сигнала для канала Р8 теменной доли. Зеленая и оранжевая кривые — восстановленные сигналы, полученные методами РВ и ССИ соответственно. (В) распределение медианных значений отношений $\frac{\varepsilon_{\text{ССИ}}}{\varepsilon_{\text{РВ}}}$ по поверхности головы среди 23 испытуемых.

Таким образом, метод РВ обладает высокой эффективностью в задаче реконструкции зашумленных сигналов ЭЭГ. Его использование позволяет восстанавливать недостающую информацию с существенно меньшей ошибкой по сравнению с классическими методами. Это открывает перспективы для применения РВ в анализе нейрофизиологических данных, особенно в случаях, когда наличие артефактов или потеря данных могут существенно исказить результаты исследования когнитивных процессов.

Разработан новый метод расширенной кластеризации и модельной аппроксимации (РКМА) для детектирования точных глазодвигательных характеристик по данным окулографического сигнала в условиях повышенного уровня шума. Алгоритм основан на кластеризации методом k -средних в скользящем временном окне с добавлением задержек и последующей аппроксимацией с использованием параметрической модели саккады⁹:

$$s(t; \eta, c, \tau) = cf\left(\frac{\eta t}{c}\right) - cf\left(\frac{\eta(t-\tau)}{c}\right) \quad (2)$$

Модель описывает важную физиологическую характеристику, известную как "основная последовательность"¹⁰, которая описывает зависимость между пиковой угловой скоростью и амплитудой саккад. В общем случае модель имеет три свободных параметра η , c , τ , которые определяют основные характеристики саккады. Форма саккады формируется кусочной функцией $f(t)$, представленной в виде:

$$f(t) = \begin{cases} t + 0.25e^{-2t}, & t \geq 0 \\ 0.25e^{2t}, & t \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Для введения реальных физиологических характеристик саккад, таких как: амплитуда и длительность, параметр η был рассчитан как:

$$\eta = c \cdot \frac{\ln^{0.5}\left(\frac{a}{ec+1}\right)}{d} \quad (4)$$

где a – амплитуда саккады, d – длительность саккады, p - порог, определяющий границы (начало и конец) саккады как процент от максимальной скорости.

Введение задержек расширяет пространство кластеризации и позволяет учесть временную структуру окулографического сигнала, улучшая разделение фиксаций в скользящем окне при наличии шума. После кластеризации места потенциальных саккад определяются, как точка перехода из одного кластера в другой. В выявленных временных интервалах проводится финальная аппроксимация параметрической моделью, позволяющая уточнить ключевые характеристики движений глаз, включая положение, амплитуду, длительность и скорость.

Апробация и тестирование разработанного алгоритма проводились на смоделированном ЭОГ сигнале с использованием модели, предложенной в работе¹¹.

⁹ Dai W. et al. A parametric model for saccadic eye movement // 2016 IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB). – 2016. – С. 1-6

¹⁰ Bahill A. T., Clark M. R., Stark L. The main sequence, a tool for studying human eye movements // Mathematical biosciences. – 1975. – Т. 24. – №. 3-4. – С. 191-204.

¹¹ Schweitzer R., Rolfs M. Definition, modeling, and detection of saccades in the face of post-saccadic oscillations // Eye tracking: Background, methods, and applications. – New York, NY : Springer US, 2022. – С. 69-95.

Данная модель является биорелевантной и включает в себя сложную динамику саккад, включая пост-саккадические осцилляции и модель фиксационного дрейфа¹².

Для проверки устойчивости алгоритма к изменяющемуся уровню шума на сигнал накладывался розовый шум со спектральной характеристикой $\frac{1}{f^\alpha}$, для ЭОГ коэффициент $\alpha = 1$. На рис. 2А представлена зависимость предельного отношения сигнал/шум, при котором отсутствуют лишние кластерные переходы, вызываемые накладываемым шумом, от количества задержек.

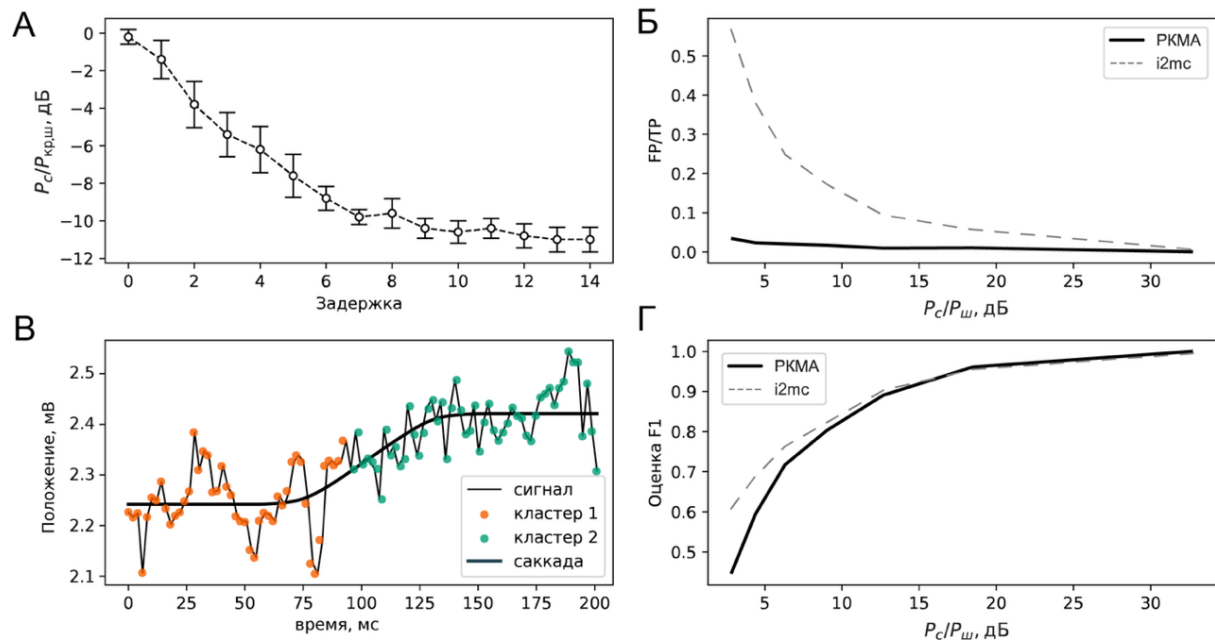


Рисунок 2. Иллюстрация работы алгоритма детектирования окуломоторных характеристик ЭОГ сигнала. (А) зависимость отношения мощности сигнала (P_c) к критическому уровню шума ($P_{кр.ш}$), при котором не находится ни один лишний кластерный переход от введенных задержек. (Б) зависимость отношения ошибочных (FP) к правильным (TP) детектированиям саккад от разного уровня сигнал/шум для алгоритма расширенной кластеризации и модельной аппроксимации (PKMA) и i2mc. (В) пример модельной аппроксимации. (Г) F1 оценка для алгоритмов PKMA и i2mc соответственно.

На рис. 2В представлена иллюстрация этапа аппроксимации саккады, где показана принадлежность каждой точки сигнала к соответствующему кластеру. Разработанный алгоритм сравнивался с устойчивым к шуму алгоритмом i2mc¹³. На рис. 2Б, Г показаны 2 ключевые метрики: отношение ошибочных (FP) к правильным (TP) детектированиям и F1 оценка точности.

¹² Engbert R. et al. An integrated model of fixational eye movements and microsaccades // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2011. – Т. 108. – №. 39. – С. E765-E770.

¹³ Hessels R.S. et al. Noise-robust fixation detection in eye-movement data - Identification by 2-means clustering (I2MC) // Behavior Research Methods. – 2017. – Т. 49. – №. 5. – С. 1802-1823.

Таким образом, разработанный метод демонстрирует высокую устойчивость к шумовым искажениям и обеспечивает высокую точность при детектировании глазодвигательных характеристик на основе окулографического сигнала. При сопоставимой F1-метрики между методами, предложенный нами подход обеспечивает более надежное выявление саккад за счет значительного сокращения количества ложноположительных детекций, что подтверждается низким отношением FP/TP в широком диапазоне отношения сигнал/шум. Это особенно важно в задачах высокоточной обработки окулографических сигналов, например, при определении фиксационно-зависимых вызванных потенциалов ЭЭГ или исследовании глазодвигательной активности, где критичны надёжность классификации и точность распознавания фиксаций и саккад.

Во второй главе диссертационной работы описана разработанная экспериментальная парадигма, исследуются поведенческие реакции и механизмы связанные с процессами усвоения новой информации, выявлены ЭЭГ биомаркеры, характеризующие активность головного мозга при обработке и усвоении информации, поступающей от различных сенсорных каналов восприятия.

Экспериментальная парадигма основана на предъявлении информации в виде: «текст», «звук», «текст + звук». Эксперимент проходил в два этапа (2 дня, через один день) (см. рис. 3, А). В первый день испытуемые проходили этап обучения, где им были предъявлены 180 фактов из разных областей (физика, химия, информатика, педагогика, искусство, история). Каждый факт был предъявлен в случайно выбранной одной из трех возможных сенсорных модальностей («текст», «звук», «текст и звук»). Количество предъявляемых фактов было сбалансировано и составляло 30 фактов на одну область. После прохождения этапа обучения испытуемые проходили этап тестирования на проверку знания фактов. Тестирование включало целевые (правильные факты) и не целевые (факты сформулированные с ошибкой) пробы. Во второй день испытуемые проходили только этап тестирования. Чтобы учесть влияние предварительного знания факта, в конце эксперимента (во второй день) испытуемый проходил дополнительный опросник. Для оценки психофизиологического состояния испытуемых до и после прохождения экспериментального исследования был использован ряд субъективных тестов таких как: субъективная шкала оценки астении (MFI-20)¹⁴ и тест на усталость с использованием визуальной-аналоговой шкалы (ВАШ)¹⁵. Каждый этап эксперимента был поделен на 4 равных блока, разделенных между собой ВАШ тестом (см. рис. 3, Б). В ходе эксперимента регистрировалась электрическая активность мозга с

¹⁴ Smets E. M. A. et al. Application of the multidimensional fatigue inventory (MFI-20) in cancer patients receiving radiotherapy // British journal of cancer. – 1996. – Т. 73. – №. 2. – С. 241-245.

¹⁵ Bijur P. E., Silver W., Gallagher E. J. Reliability of the visual analog scale for measurement of acute pain // Academic emergency medicine. – 2001. – Т. 8. – №. 12. – С. 1153-1157.

использованием 64 канальной ЭЭГ в соответствии со схемой 10-10, вертикальная и горизонтальная компоненты ЭОГ, а также все ответы испытуемого.

Особенность данной парадигмы и ее отличие от других парадигм, направленных на исследование работы долговременной памяти, заключается в предъявлении уникальных стимулов в виде: «текст», «звук», «текст + звук» и двухэтапном тестировании.

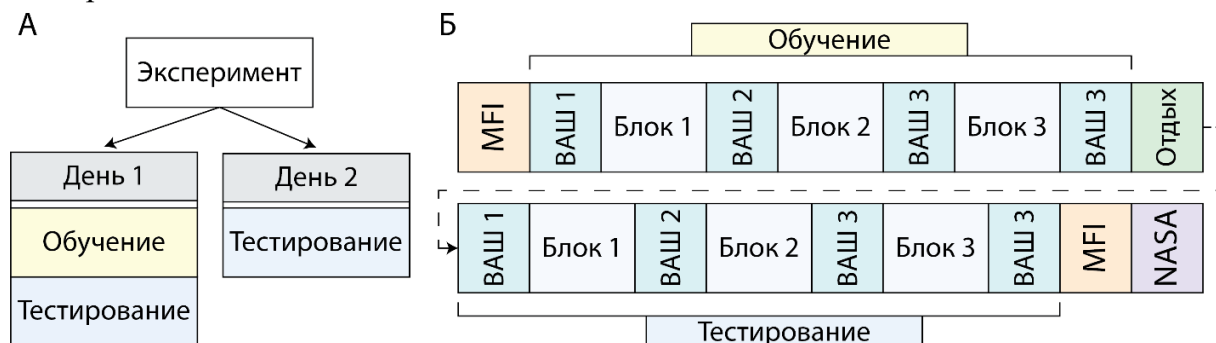


Рисунок 3. Иллюстрация экспериментальной парадигмы. (А) общая структура эксперимента. (Б) детальная структура всех этапов эксперимента.

Статистический анализ экспериментальных данных включал применение дисперсионного анализа RM ANOVA для оценки эффектов на групповом уровне, при этом размер эффекта оценивался с помощью частичного эта-квадрат (η_p^2). Анализ поведенческих характеристик показал, что успешность выполнения задания определяется преимущественно наличием предварительного знания ($p < 0.01$, $F = 218.2$, $\eta^2 = 0.89$), в то время как вид предъявляемой информации не оказывал статистически значимого влияния на результативность ($p = 0.16$, $F = 1.8$, $\eta^2 = 0.07$).

Для анализа спектральных характеристик активности головного мозга был использован метод вейвлет-преобразования сигналов ЭЭГ¹⁶. Перед проведением анализа данные были предварительно очищены от низкочастотного дрейфа и высокочастотных шумов, а артефакты сердечной (ЭКГ) и ЭОГ активности удалены с помощью метода независимых компонент (ICA). Кроме того, на временных отрезках с зашумленными ЭЭГ каналами была произведена реконструкция сигнала с использованием метода на основе РВ, разработанного в первой главе диссертационной работы. Для статистического анализа мощности ЭЭГ использовался парный Т-тест в сочетании с непараметрической кластерной коррекцией для множественных сравнений и рандомизации по методу Монте-Карло¹⁷. Кластер считался значимым, когда р-значение было ниже 0.05. Количество

¹⁶ Hramov A.E. et al. Wavelets in Neuroscience. 2nd edition. Springer, 2021

¹⁷ Oostenveld R. et al. FieldTrip: open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data // Computational intelligence and neuroscience. – 2011. – Т. 2011. – С. 1-9.

перестановок составляло 5000. Значения вейвлет-мощности на интересующих интервалах были нормированы на вейвлет-мощность при фиксации (крест), предшествующей стимулу, и обозначено как (ERSP, Event-Related Spectral Perturbation). Кроме того, используя разработанный метод РКМА, был проанализирован λ -ответ — это связанный с событиями потенциал (FRP), наблюдаемый в затылочной области мозга, в момент начала фиксации глаз, отражающий афферентный поток обработки визуальной информации.

В ходе анализа мощности ЭЭГ на этапе обучения в момент отдыха, после предъявления стимула, было выявлено, что спектральная мощность ЭЭГ для успешно запомненных фактов выше в тета-, альфа-, бета-диапазонах в отведениях, расположенных в лобной, правой височной и теменной зонах (см. рис. 4). Успешно запомненным фактом являлось произведение ответов за два этапа эксперимента. Рассматривались только те вопросы, которые человек заранее не знал. Кроме того, на основании полученных результатов анализа поведенческих характеристик, вид информации не учитывался в качестве значимого фактора.

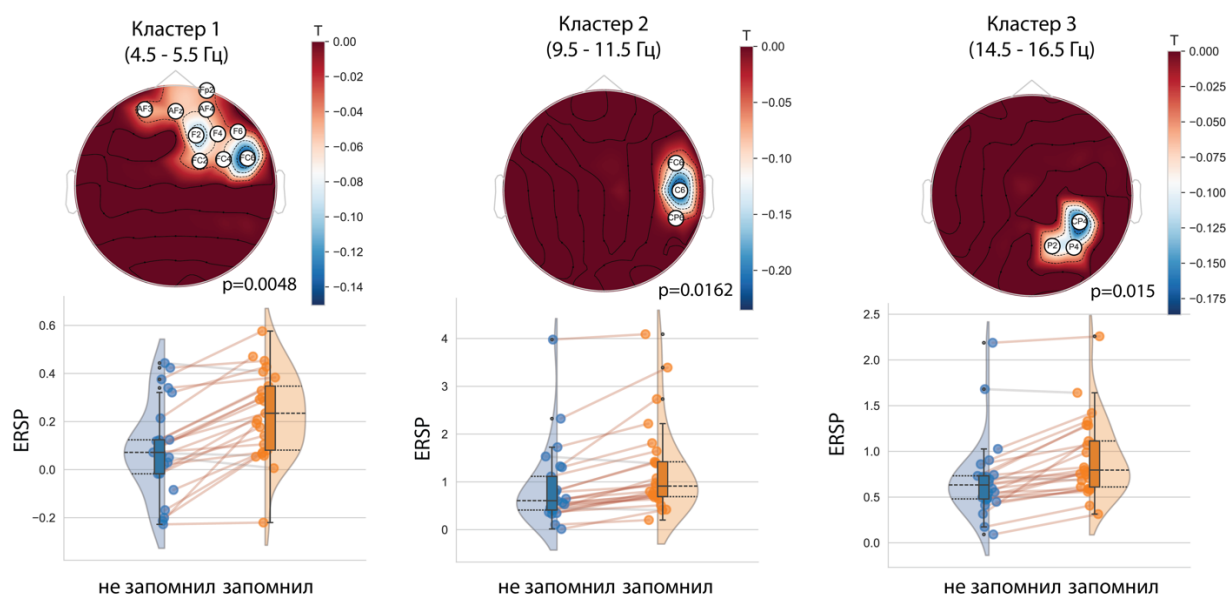


Рисунок 4. Сравнение условий успешного и не успешного запоминания факта на этапе обучения в период отдыха после предъявления стимула. Визуализация кластеров и групп значимых каналов после сравнения ERSP между успешно и не успешно запомненными фактами. Топограммы отражают значения Т-статистики и усредненные по испытуемым значения ERSP в сравниваемых условиях. Диаграмма показывает ERSP, усредненный по датчикам ЭЭГ, принадлежащим соответствующему кластеру. Разница между условиями показана с 95% доверительным интервалом.

В результате анализа нейронной активности головного мозга с использованием вейвлет-преобразования сигналов ЭЭГ было выявлено, что повышение мощности тета-, альфа- и бета-ритмов в лобной, правой височной и теменной областях во время периода отдыха после предъявления стимула способствует успешному запоминанию. В частности, усиление тета-ритма вероятно обеспечивает временную синхронизацию между гиппокампом и неокортексом, критически важную для консолидации информации в долговременной памяти¹⁸. Рост мощности альфа-диапазона в правой височной области указывает на активное подавление звукового фона, что способствует фокусировке внимания¹⁹. Рост мощности бета-осцилляций в теменной области во время запоминания согласуется с гипотезами о том, что бета-активность участвует в нисходящей регуляции процесса обработки информации²⁰.

Кроме того, важным аспектом исследования стал анализ λ -ответа²¹, регистрируемого в затылочной области на отведениях O_1 , O_z , O_2 (см. рис. 5А).

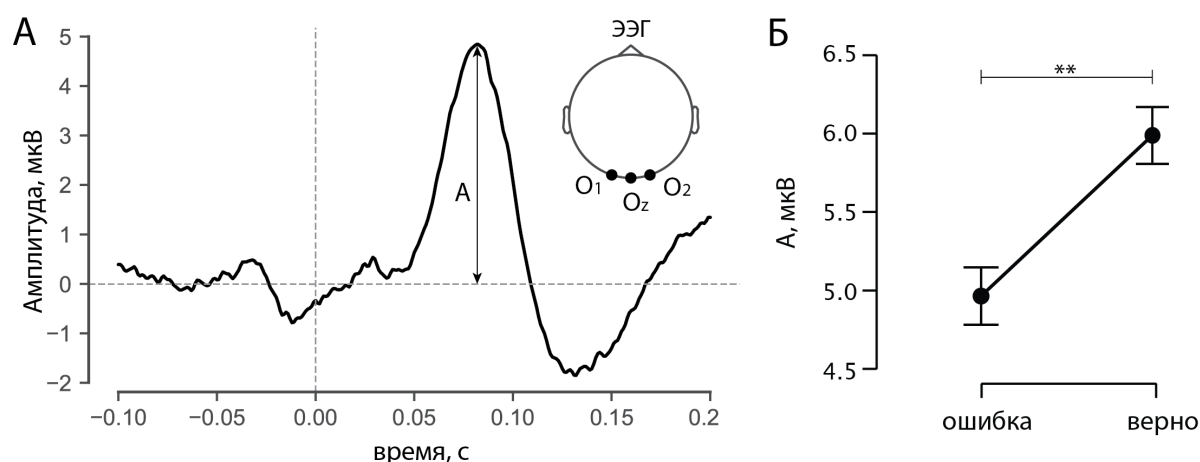


Рисунок 5. (А) Вызванный потенциал (λ -ответ). (Б) Амплитуда вызванного потенциала от правильности ответа на этапе тестирования (** $p < 0.01$).

В рамках исследования было установлено, что при чтении вопроса на этапе тестирования амплитуда λ -ответа была значительно выше в случае верного ответа (см. рис. 5Б). Этот результат отражает повышенную активность зрительной коры при верных ответах, указывая на вовлечённость механизмов визуального анализа, необходимых для выделения ключевых элементов вопроса, их последующего понимания и интерпретации. Полученные данные дополняют выявленные ранее

¹⁸ Babiloni C. et al. Hippocampal, amygdala, and neocortical synchronization of theta rhythms is related to an immediate recall during rey auditory verbal learning test // Human brain mapping. – 2009. – Т. 30. – №. 7. – С. 2077-2089.

¹⁹ Payne L. et al. A right-ear bias of auditory selective attention is evident in alpha oscillations // Psychophysiology. – 2017. – Т. 54. – №. 4. – С. 528-535.

²⁰ Richter C. G., Coppola R., Bressler S. L. Top-down beta oscillatory signaling conveys behavioral context in early visual cortex // Scientific reports. – 2018. – Т. 8. – №. 1. – С. 6991.

²¹ Ries A. J., Slayback D., Touryan J. The fixation-related lambda response: Effects of saccade magnitude, spatial frequency, and ocular artifact removal // International Journal of Psychophysiology. – 2018. – Т. 134. – С. 1-8.

паттерны спектральной мощности и подчёркивают важность применения мультимодального анализа, основанного на совместной обработке ЭЭГ и ЭОГ сигналов, для изучения нейронных механизмов запоминания.

В третьей главе диссертационной работы исследуются механизмы адаптации кортикальной сети головного мозга при продолжительной когнитивной нагрузке.

Для исследования компенсаторных механизмов, позволяющих поддерживать эффективность работы кратковременной памяти в условиях продолжительной когнитивной нагрузки, был разработан и проведен эксперимент с использованием теста Штернберга на рабочую память, который позволяет оценить эффективность кратковременного удержания и обработки информации. Эксперимент состоял из 4 одинаковых блоков, каждый из которых включал 72 задания (см. рис. 6А). Задания были разделены на две категории сложности: низкая (2-3 буквы для запоминания) и высокая (6-7 букв). Для оценки субъективной усталости использовались опросники MFI-20 и NASA-TLX, а также ВАШ (см. рис. 6Б).

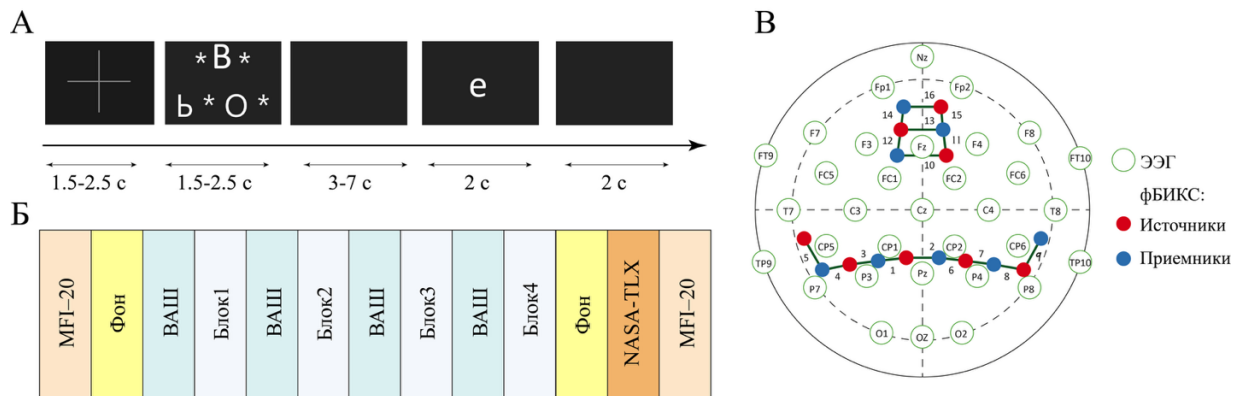


Рисунок 6. Иллюстрация экспериментальной парадигмы с использованием теста Штернберга на рабочую память. (А) структура одного задания. (Б) общая структура эксперимента. (В) схема расстановки сенсоров на поверхности головы.

В отличие от первого эксперимента, где основной акцент был сделан на изучении процессов кодирования и извлечения информации из долговременной памяти, данный эксперимент фокусируется на исследовании динамических изменений в работе мозга при выполнении повторяющихся кратковременных операций с информацией, задействующих функции памяти и внимания. Особенностью данного исследования является использование мультимодального подхода, сочетающего регистрацию гемодинамической активности мозга (фБИКС) и движений глаз. Схема расстановки фБИКС сенсоров с привязкой к расположению ЭЭГ, для лучшего понимания расстановки, представлена на рисунке 6В.

Для анализа полученных экспериментальных данных был использован комплексный подход, включающий методы обработки сигналов, статистического анализа и теории графов. Предварительная обработка данных фБИКС включала

применение полосового фильтра 0.04-0.07 Гц для удаления физиологических шумов (волны Майера ~0.1 Гц, дыхание ~0.25 Гц и сердцебиение ~1 Гц). Изменения концентрации общего гемоглобина (totHb) рассчитывались с использованием модифицированного закона Бера-Ламберта²². Для определения функциональной связности мозга вычислялись коэффициенты корреляции Пирсона между парами сигналов totHb для каждого блока эксперимента. На основе полученной матрицы корреляций (размером 16×16) рассчитывались характеристики сети, такие как глобальный коэффициент кластеризации, глобальная эффективность, средняя сила связности в лобной и теменной долях, а также между ними.

Для анализа движений глаз использовался метод детектирования саккад и фиксаций (PKMA), разработанный в первой главе диссертационной работы. В качестве основных показателей рассматривались средняя длительность фиксаций и доля фиксаций средней длительности (150-900 мс) от общего числа фиксаций. Для минимизации межиндивидуальной вариабельности размер зрачка нормировался на среднее значение за 60 с до основной части эксперимента.

Статистический анализ включал применение дисперсионного анализа RM ANOVA для оценки эффектов на групповом уровне, при этом размер эффекта оценивался с помощью частичного эта-квадрат (η_p^2). Для post-hoc анализа использовался парный Т-тест с поправкой на множественные сравнения методом Холма-Бонферрони. Для оценки изменений усталости, измеренной с помощью опросника MFI-20, применялся критерий знаковых рангов Уилкоксона, а размер эффекта оценивался с помощью ранговой бисериальной корреляции (RBC). Корреляционный анализ между парами характеристик, изменяющихся в ходе эксперимента, проводился с использованием метода корреляции повторных измерений. Для исследования связи между MFI-20 и поведенческими результатами применялась корреляция Спирмена. Порог статистической значимости был установлен на уровне $p < 0.05$. Для расчёта характеристики успешности выполнения задания использовался обратный индекс эффективности (IES, Inverse Efficiency Score)²³ — интегральная метрика, объединяющая скорость реакции и точность выполнения задания. *IES* рассчитывалась как:

$$IES = \frac{\overline{RT}}{PC} \quad (5)$$

где $\overline{RT}$ — среднее время реакции, PC — доля правильных ответов.

Основные результаты исследования показали, что несмотря на значительное увеличение субъективной усталости участников ($p < 0.05$, $F = 36.87$, $\eta_p^2 = 0.71$) и

²² Baker W. B. et al. Modified Beer-Lambert law for blood flow // Biomedical optics express. – 2014. – Т. 5. – №. 11. – С. 4053-4075.

²³ Bruyer R., Brysbaert M. Combining speed and accuracy in cognitive psychology: Is the inverse efficiency score (IES) a better dependent variable than the mean reaction time (RT) and the percentage of errors (PE)? // Psychologica Belgica. – 2011. – Т. 51. – №. 1.

объективных индикаторов утомления (уменьшение размера зрачка, $p < 0.05$, $F = 4.31$, $\eta_p^2 = 0.24$) на протяжении эксперимента, точность выполнения задач оставалась неизменной благодаря активации компенсаторных механизмов головного мозга. Среднее время реакции на задачи высокой сложности стабильно составляло около 950 мс во всех блоках, что свидетельствует о привлечении дополнительных ресурсов, обеспечивающих стабильность показателей успешности. В то же время среднее время реакции на задачи низкой сложности увеличилось с 700 мс в первом блоке до 830 мс в четвертом блоке, что указывает на постепенное истощение ресурсов мозга в условиях продолжительной когнитивной нагрузки.

Структура значимых связей между анализируемыми показателями отражена в схеме сетевых взаимосвязей (см. рис. 7). Данная схема облегчает интерпретацию данных и позволяет выделить три ключевых домена измерений, соответствующих различным аспектам когнитивной деятельности: поведенческие данные (включая *IES* для заданий разной сложности), показатели фБИКС (средняя сила связности $\bar{C}$ в лобной, теменной и лобно-теменной областях) и параметры видеоокулографии (доля средних фиксаций и размер зрачка). Цвет линий отражает направление (положительные или отрицательные корреляции).

Чтобы учесть успешность выполнения задания и время реакции, был рассчитан *IES* индекс и проведен корреляционный анализ с повторными измерениями, который позволил выявить, что дифференцированное влияние усталости на выполнение заданий на кратковременную память обусловлено компенсаторными механизмами, зависящими от сложности задачи (см. рис. 7). При выполнении простых заданий рост усталости сопровождается увеличением обратного индекса эффективности *IES* ($r = 0.44$, $p = 0.0035$) и ослаблением функциональной связности $\bar{C}$ в теменной ($r = -0.47$, $p = 0.0016$) и лобно-теменной областях ($r = -0.38$, $p = 0.0017$). В отличие от этого, при выполнении сложных заданий влияние усталости на эффективность выполнения задания отсутствует, а обратный индекса эффективности определяется уровнем связности в лобной области, что проявляется в их корреляционной взаимосвязи ($r = -0.31$, $p = 0.041$).

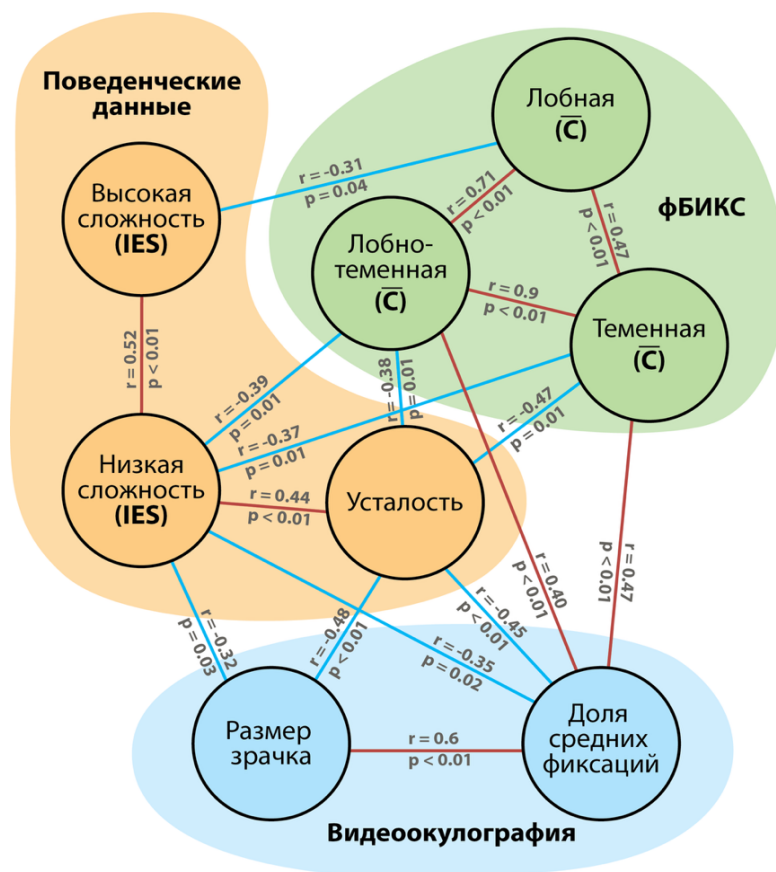


Рисунок 7. Карта парных значимых корреляций между характеристиками, изменяющимися в ходе решения задачи, полученная с помощью корреляции повторных мер, где: IES – обратный индекс эффективности, $\bar{C}$ – средняя сила связи.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии компенсаторных механизмов в работе кортикальной сети головного мозга, которые активируются в условиях высокой сложности, предотвращая ухудшение производительности при

длительной нагрузке за счет модуляции силы связи в лобной доле. Эти механизмы позволяют поддерживать эффективность выполнения задач даже в условиях нарастающей усталости. Кроме того, обнаруженная связь между функциональной связностью мозга, параметрами движений глаз и субъективной усталостью позволяет рассматривать сетевые характеристики как биомаркеры когнитивного утомления.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные при выполнении диссертационной работы:

1) Разработан и апробирован метод восстановления зашумленных ЭЭГ сигналов на основе резервуарных вычислений. Тестирование на модельных и экспериментальных данных показало превосходство над методами линейной регрессии и сферической сплайн-интерполяции.

2) Разработан и апробирован алгоритм детектирования глазодвигательных характеристик РКМА, основанный на кластеризации с временными задержками и параметрической аппроксимации. Метод продемонстрировал более высокую устойчивость к шуму по сравнению с походом i2ms в диапазоне отношения сигнал/шум 3–30 дБ при сохранении высокой чувствительности и низком уровне ложноположительных срабатываний (менее 5%).

3) Разработана и реализована оригинальная двухэтапная экспериментальная парадигма, позволяющая исследовать механизмы усвоения

информации, поступающей от различных сенсорных каналов восприятия: зрение и слух.

4) Показано, что успешное усвоение новой информации, представленной в виде текста, звука или их сочетания, сопровождается совместным увеличением спектральной мощности ЭЭГ в состоянии отдыха: в тета-диапазоне (4.5–5.5 Гц) — в лобной, альфа-диапазоне (9.5–11.5 Гц) — в правой височной и бета-диапазоне (14.5–16 Гц) — в теменной зонах мозга. Эти изменения отражают процессы консолидации памяти, подавления нерелевантных звуковых стимулов и нисходящего контроля обработки информации.

5) Установлено, что амплитуда фиксационно-связанного потенциала λ -ответа, регистрируемого в затылочной области на отведениях O1, Oz, O2, выше для правильных ответов на этапе тестирования.

6) Разработана и реализована экспериментальная парадигма для исследования рабочей памяти в условиях длительной когнитивной нагрузки, основанная на задаче Штернберга.

7) Выявлены компенсаторные механизмы адаптации лобно-теменной сети, обеспечивающие сохранение эффективности при выполнении сложных заданий в условиях нарастающей усталости за счёт мобилизации когнитивных ресурсов посредством нисходящей регуляции внимания.

8) Обнаружен ряд статистически значимых корреляций между функциональной связностью, глазодвигательной активностью и субъективным уровнем усталости, что позволяет рассматривать эти показатели как объективные биомаркеры когнитивного утомления и нейронной адаптации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

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. 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.

Публикации в сборниках трудов конференций, индексируемые в Scopus и/или Web of Science

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.

АНТИПОВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

**БИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ УСВОЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ГОЛОВНОМ
МОЗГЕ ЧЕЛОВЕКА: АНАЛИЗ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ
НЕЙРОННОЙ И ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать __.__.2025 г.

Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 1,5

Тираж 100 экз. Заказ __

Отпечатано в Полиграфическом центре
Балтийского федерального университета им. И. Канта
236001, г. Калининград, ул. Гайдара, 6