

искусственного интеллекта ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта».

Диплом об окончании аспирантуры № 106431 0636618 выдан 01.07.2023 Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.». Справка о сдаче кандидатского экзамена по специальной дисциплине по научной специальности 1.5.2 Биофизика (физико-математические науки) № 3539 от 22.09.2023 г. выдана Федеральным государственным автономным образовательным учреждением «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта».

Научные руководители – доктор физико-математических наук Максименко Владимир Александрович, ведущий научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, а также доктор физико-математических наук, профессор Храмов Александр Евгеньевич, главный научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, утвержденные приказом ректора Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» от 03.07.2023 г. № 258ас, представили положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании Балтийского Центра нейротехнологий и искусственного интеллекта ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» с приглашением специалистов по профилю диссертации из СГУ им. Н.Г. Чернышевского. На заседании присутствовали:

1. Шушарина Н.Н., кандидат педагогических наук, доцент ОНК «Институт медицины и наук о жизни», руководитель БЦНИИ БФУ им. И.Канта;
2. Демин М.В., кандидат физико-математических наук, проректор по научной работе БФУ им. И.Канта;
3. Храмов А.Е., доктор физико-математических наук, профессор, г.н.с. БЦНИИ БФУ им. И.Канта;
4. Караваев А.С., доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ им. Н.Г. Чернышевского;
5. Казанцев В.Б., доктор физико-математических наук, доцент, в.н.с. БЦНИИ БФУ им. И.Канта;

6. Максименко В.А., доктор физико-математических наук, в.н.с. БЦНИИИ БФУ им. И.Канта;
7. Куркин С.А., доктор физико-математических наук, доцент, в.н.с. БЦНИИИ БФУ им. И.Канта;
8. Лобов С.А., доктор физико-математических наук, в.н.с. БЦНИИИ БФУ им. И.Канта;
9. Гордлеева С.Ю., кандидат физико-математических наук, в.н.с. БЦНИИИ БФУ им. И.Канта;
10. Бадарин А.А., кандидат физико-математических наук, с.н.с. БЦНИИИ БФУ им. И.Канта;
11. Грубов В.В., кандидат физико-математических наук, с.н.с. БЦНИИИ БФУ им. И.Канта;
12. Ковалёв А.А., кандидат технических наук, с.н.с. БЦНИИИ БФУ им. И.Канта;
13. Андреев А.В., кандидат физико-математических наук, с.н.с. БЦНИИИ БФУ им. И.Канта;
14. Пицик Е.Н., кандидат физико-математических наук, м.н.с. БЦНИИИ БФУ им. И.Канта;
15. Куц А.К., м.н.с. БЦНИИИ БФУ им. И.Канта.

Рецензенты диссертации:

1. Караваев А.С., доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов;
2. Лобов С.А., доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Балтийского Центра нейротехнологий и искусственного интеллекта, Балтийский федеральный университет имени И. Канта, г. Калининград.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение.

Заключение

Диссертация Куца Александра Константиновича посвящена выявлению электроэнцефалографических биомаркеров, характеризующих биофизические механизмы обработки головным мозгом визуальной сенсорной информации в условии неоднозначности, а также разработке математического аппарата для описания выявленных биомаркеров.

Соответствие специальности. Содержание диссертации соответствует специальности 1.5.2 «Биофизика» (физико-математические науки) и 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки), удовлетворяя паспортам специальностей.

Научная новизна результатов диссертации Куца А.К. заключается в следующем:

- Выявлены особенности структуры сигналов ЭЭГ, характеризующие обработку неоднозначной визуальной информации. Показано, что увеличение неоднозначности информации индуцирует более высокую мощность сигналов ЭЭГ, регистрируемых в лобной области. При этом, обработка головным мозгом сенсорной информации при низкой неоднозначности вызывает более высокую мощность сигналов ЭЭГ в затылочной области.

- Впервые выявлены изменения структуры сигналов ЭЭГ, характеризующие адаптацию нейронной сети мозга к обработке неоднозначной сенсорной информации. Показано, что в ходе эксперимента по обработке большого числа неоднозначных стимулов, наблюдается увеличение мощности сигналов ЭЭГ в альфа-диапазоне в теменной области, что коррелирует с повышением скорости обработки стимулов.

- Обнаружены особенности структуры сигналов ЭЭГ, характеризующие концентрацию внимания в ходе обработки неоднозначной визуальной информации. Показано, что неоднозначность информации индуцирует высокую мощность ЭЭГ в бета-диапазоне во фронтальной области головного мозга на протяжении 0.3-0.6 с после демонстрации визуального стимула, что является признаком активации выборочного внимания, необходимого для определения наиболее релевантных признаков.

- Разработан численный алгоритм для формирования набора признаков для классификации состояний головного мозга, связанных с обработкой визуальной информации в условиях высокой и низкой неоднозначности. Разработана математическая модель, основанная на сверточной нейронной сети, обучаемая с использованием сформированного набора признаков, применение которой позволяет повысить обобщающую способность классификаторов на основе машинного обучения и их устойчивость к варибельности данных между испытуемыми.

- Создан комплекс программ для обработки электроэнцефалографических сигналов, полученных в ходе экспериментов по восприятию визуальной информации, с целью формирования пространства признаков для машинного

алгоритма классификации состояний мозга, связанных с обработкой визуальной информации в условиях высокой и низкой неоднозначности.

Практическая значимость обусловлена возможностью использования полученных в диссертационной работе результатов для разработки пассивных интерфейсов мозг-компьютер, осуществляющих мониторинг когнитивного состояния пользователя. Так, например, контроль поступающей визуальной информации в условиях высокой и низкой неоднозначности важен в таких сферах деятельности, как пилотирование самолета или управление атомной электростанцией. Помимо этого, полученные результаты могут быть применены для диагностики состояния центральной нервной системы, так как поражение центральной нервной системы может вызывать нарушения сенсорной обработки.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. При увеличении неоднозначности визуальной информации, мозг меняет стратегию её обработки. Когда информация однозначна, она обрабатывается преимущественно в зрительной (затылочной) коре, что сопровождается повышением спектральной мощности сигналов ЭЭГ на затылочных отведениях в дельта-диапазоне частот 1 – 3.5 Гц. Когда информация неоднозначна, для ее интерпретации задействуется информация, накопленная в памяти и отражающая опыт и знания, о чём свидетельствует высокая мощность ЭЭГ в дельта- и тета-диапазонах частот 1 – 9.5 Гц на лобных отведениях ЭЭГ.

2. На начальном этапе обработки неоднозначной визуальной информации, головной мозг человека фокусирует внимание на выделении наиболее важных фрагментов, что сопровождается высокой спектральной мощностью сигналов ЭЭГ в бета-диапазоне частот 15 – 30 Гц в лобной области в первые 0.3 с после появления стимула.

3. При обработке несколько схожих зрительных стимулов подряд наблюдается эффект тренировки, который заключается в уменьшении времени принятия решения относительно визуальной информации и сопровождается увеличением мощности сигналов ЭЭГ в правой височной области в альфа-диапазоне 9 – 11 Гц. Повышение мощности наблюдается как во время обработки стимула, так и перед ним, что свидетельствует о преактивации областей, необходимых для обработки неоднозначных стимулов.

4. Предложен численный алгоритм и программное обеспечение на его основе для формирования пространства признаков с использованием статистического анализа мощности ЭЭГ между классами, который обеспечивает устойчивость

машинного алгоритма к переобучению и вариабельности данных между испытуемыми в задачи классификации состояний нейронной сети головного мозга человека на основе сигналов ЭЭГ. Алгоритм позволяет достичь точности классификации 74% при анализе данных новых испытуемых. При этом, вариабельность точности между испытуемыми составляет всего 1.6%.

Личный вклад. Все результаты, представленные в данной диссертационной работе получены лично автором. Помимо этого, автором производилась разработка программного обеспечения для экспериментальных исследований, предварительной обработки и анализа нейрофизиологических данных. Постановка задач, обсуждение результатов и их интерпретация проводились совместно с научными руководителями и соавторами опубликованных работ.

Достоверность полученных результатов обеспечиваются использованием методов и подходов к экспериментальным исследованиям и анализу данных, которые строго обоснованы, апробированы и широко обсуждены в современной научной литературе. Достоверность результатов, полученных с использованием сигналов ЭЭГ, подтверждается их соответствием результатам, полученным с использованием других методов регистрации (фМРТ и МЭГ) и ранее описанным в научной литературе. Все полученные результаты анализа ЭЭГ имеют четкую биофизическую интерпретацию, которая соответствует современным биофизическим представлениям и не противоречит достоверно известным результатам. Все выводы в диссертационной работе сделаны на основе результатов статистического анализа с подробным описанием результатов и параметров тестов. Достоверность результатов, полученных с использованием разработанных численных алгоритмов и комплекса программ подтверждаются проведенными исследованиями точности и устойчивости расчетных методик, а также решением тестовых задач.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены докладами на следующих всероссийских и международных научных мероприятиях: II, III, IV Международная школа молодых ученых «Динамика сложных сетей и их применение в интеллектуальной робототехнике» (DCNAIR-2018, Саратов, 2018; DCNAIR-2019, Иннополис, 2019; DCNAIR-2020, Иннополис, 2020), The 9th International Scientific Conference on Physics and Control (PhysCon2019, Иннополис, 2019), Workshop "Robotics, Electronics and Machine Vision" (REMV-2021, Мальта, 2021), International Conference "Nonlinearity,

Information and Robotics" (NIR-2020, Иннополис, 2020), V, VI, VII Scientific School "Dynamics of Complex Networks and their Applications" (DCNA'2021, Калининград, 2021; DCNA'2022, Калининград, 2022; DCNA'2023, Калининград, 2023), VII, VIII, IX, X Симпозиум по оптике и биофотонике (SFM 2019, Саратов, 2019; SFM 2020, Саратов, 2020; SFM 2021, Саратов, 2021; SFM 2022, Саратов, 2022).

Научные публикации. Основное содержание и результаты диссертации отражены в 31 публикациях автора, включая 7 статей в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science и входящих в перечень ВАК, 2 из которых опубликованы в журналах первого квартиля Q1, 13 статьёй в сборниках трудов конференций, индексируемых в Scopus, 11 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

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

- 1) Куц А. К., Максименко В.А., Храмова М.В., Храмов А.Е. Исследование процесса обработки зрительной информации в зависимости от ориентации стимулов по многоканальным записям ЭЭГ // Информационно-управляющие системы. – 2020. – №. 1 (104). – С. 73-80.
- 2) Kuc A. K., Grubov V. V., Maksimenko V. A., Shusharina N. N., Pisarchik A. N., Hramov A. E. Sensor-level wavelet analysis reveals eeg biomarkers of perceptual decision-making // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – No. 7. – P. 2461. (журнал Q1)
- 3) Kuc A. K., Korchagin S. A., Maksimenko V. A., Shusharina N. N., Hramov A. E. Combining statistical analysis and machine learning for eeg scalp topograms classification // Frontiers in Systems Neuroscience. – 2021. – Vol. 15. – P. 716897.
- 4) Kuc A. K., Kurkin S. A., Maksimenko V. A., Pisarchik A. N., Hramov A. E. Monitoring brain state and behavioral performance during repetitive visual stimulation // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – No. 23. – P. 11544.
- 5) Куц А. К., Максименко В. А., Храмов А. Е. Влияние «сенсорной предыстории» на обработку головным мозгом неоднозначных визуальных стимулов // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2022. – Т. 30. – №. 1. – С. 57-75.
- 6) Maksimenko V., Kuc A., Frolov N., Kurkin S., Hramov A. Effect of repetition on the behavioral and neuronal responses to ambiguous Necker cube images // Scientific Reports. – 2021. Vol. 11. – No. 1. – P. 3454. (журнал Q1)
- 7) Kuc A., Maksimenko V., Savosenkov A., Grigorev N., Grubov V., Badarin A., Gordleeva S., Kazantsev V., Hramov A. Studying Perceptual Bias in Favor of The

From-above Necker Cube Perspective in a Goal-directed Behavior // *Frontiers in Psychology*. – 2023. – V. 14. – P. 1160605.

Публикации в сборниках трудов конференций, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus

- 8) Kuc A., Maksimenko V., Hramov A. Influence of Stimulus Complexity on the Properties of Neural Activity During Perceptual Process // 2018 2nd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). – IEEE, 2018. – P. 78-81.
- 9) Kuc A., Nedaivozov V. Influence of the sensory information ambiguity on the brain state during the decision-making task // 2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). – IEEE, 2019. – P. 96-97.
- 10) Kuc A., Maksimenko V. Spatio-temporal cortical activity during a visual task accomplishing // 2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). – IEEE, 2019. – P. 94-95.
- 11) Kuc A., Malova N., Maksimenko V. Spatio-temporal activity in cortical network during cognitive activity // *Saratov Fall Meeting 2019: Computations and Data Analysis: from Nanoscale Tools to Brain Functions*. – SPIE, 2020. – Vol. 11459. – P. 30-36.
- 12) Kuc A. Analysis of EEG spectral amplitudes during ambiguous information processing // 2020 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). – IEEE, 2020. – P. 144-146.
- 13) Kuc A., Grubov V., Maksimenko V., Makarov V. Estimating elementary cognitive functions based on EEG signals analysis // 2020 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). – IEEE, 2020. – P. 147-148.
- 14) Kuc A., Malova N. Spatio-temporal EEG activity in cortical network during visual perception task // 2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR). – IEEE, 2020. – P. 1-4.
- 15) Kuc A., Maksimenko V. Influence of the sensory information complexity on the features of low frequency rhythms of human EEG // *Saratov Fall Meeting 2020: Computations and Data Analysis: from Molecular Processes to Brain Functions*. – SPIE, 2021. – Vol. 11847. – P. 173-178.

- 16) Kuc A. Effect of prehistory on the ambiguous stimuli processing in the human brain // 2021 5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE, 2021. – P. 116-118.
- 17) Kuc A., Grubov V. Analysis of behavioral characteristics during prolonged cognitive load // 2021 5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE, 2021. – P. 119-121.
- 18) Kuc A., Maksimenko V. Studying behavioral performance and neural activity during a prolonged visual task // Computational Biophysics and Nanobiophotonics. – SPIE, 2022. – Vol. 12194. – P. 162-167.
- 19) Kuc A., Maksimenko V. Effect of the previous stimulus on the processing of the current stimuli during their repetitive presentation // Computational Biophysics and Nanobiophotonics. – SPIE, 2022. – Vol. 12194. – P. 156-161.
- 20) Kuc A., Batmanova A., Maksimenko V. Training Artificial Neural Network to Classify Correct and Erroneous Interpretations of Visual Stimuli before Behavioral Response // 2022 6th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE, 2022. – P. 160-162.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

- 21) Куц А.К., Максименко В.А, Бадарин А.А., Храмов А.Е. Программа для идентификации синхронных частотно-временных структур на многокомпонентных сигналах: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612996, 2018.
- 22) Куц А.К. Программа для идентификации нейрофизиологических характеристик состояния внимания и когнитивного утомления по многоканальным сигналам ЭЭГ: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664552, 2020.
- 23) Куц А.К., Максименко В.А. Программа для исследования процесса обработки визуальной сенсорной информации по многоканальным записям ЭЭГ: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664616, 2020.
- 24) Куц А.К., Максименко В.А. Программа для ЭВМ для изучения нейронной адаптации во время продолжительной когнитивной задачи: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667463, 2021.
- 25) Куц А.К. Программа для формирования и предварительной обработки экспериментальных данных на основе записей электроэнцефалограммы: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668530, 2021.

- 26) Куц А.К. Программа для формирования 2D топограмм мощности ЭЭГ для обучения классификатора на основе сверточной нейронной сети: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680472, 2021.
- 27) Куц А.К. Программа для выделения и визуализации частотно- и пространственно-временных кластеров при сравнении вейвлетной мощности ЭЭГ в двух экспериментальных условиях: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680760, 2021.
- 28) Куц А.К., Максименко В.А. Программа подготовки экспериментальных нейрофизиологических данных для обнаружения поведенческих условий, связанных с ошибочной интерпретацией визуальной информации: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662430, 2022.
- 29) Куц А.К., Максименко В.А. Программное обеспечение, формирующее выборку обучающих нейрофизиологических данных для обучения классификатора на основе сверточной нейронной сети: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663603, 2022.
- 30) Куц А.К. Программа для частотно-временной и пространственной локализации ЭЭГ-паттернов, характеризующих изменение уровня концентрации внимания: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664784, 2022.
- 31) Куц А.К., Максименко В.А., Храмов А.Е. Применение метода анализа флуктуаций относительно тренда к временным рядам электрической активности головного мозга: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667370, 2022.

Общая оценка диссертации. Диссертация Куца Александра Константиновича «Влияние неоднозначности визуальной информации на процессы ее обработки в нейронной сети головного мозга» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.5.2 – «Биофизика», 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» представляет собой самостоятельное, целостное исследование, направленное на решение актуальной биофизической научной задачи, заключающейся в изучении нейрофизиологических механизмов обработки головным мозгом визуальной информации в условиях высокой и низкой неоднозначности на основе анализа сигналов электроэнцефалограммы. Диссертационная работа выполнена на высоком уровне с применением современных методов теоретического и экспериментального исследования.

