



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

**Научный руководитель** – доктор физико-математических наук, профессор Храмов Александр Евгеньевич, главный научный сотрудник Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, утверждённый приказом ректора Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» от 29.12.2021 г. № 468ас, представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

**Научную экспертизу** диссертация проходила на заседании научного семинара Балтийского Центра нейротехнологий и искусственного интеллекта ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта». На заседании присутствовали:

1. Шушарина Н.Н., кандидат педагогических наук, доцент ИЖС, руководитель БЦНИИИ;
2. Демин М.В., кандидат физико-математических наук, проректор по научной работе;
3. Каплан А.Я., доктор биологических наук, профессор, г.н.с. БЦНИИИ;
4. Храмов А.Е., доктор физико-математических наук, профессор, г.н.с. БЦНИИИ;
5. Казанцев В.Б., доктор физико-математических наук, доцент, в.н.с. БЦНИИИ;
6. Максименко В.А., доктор физико-математических наук, в.н.с. БЦНИИИ;
7. Куркин С.А., доктор физико-математических наук, доцент, в.н.с. БЦНИИИ;
8. Лобов С.А., доктор физико-математических наук, с.н.с. БЦНИИИ;
9. Вознюк И.А., доктор медицинских наук, профессор, г.н.с. БЦНИИИ;
10. Гордлеева С.Ю., кандидат физико-математических наук, с.н.с. БЦНИИИ;
11. Бадарин А.А., кандидат физико-математических наук, с.н.с. БЦНИИИ;
12. Грубов В.В., кандидат физико-математических наук, с.н.с. БЦНИИИ;
13. Ковалёв А.А., кандидат технических наук, с.н.с. БЦНИИИ;
14. Фролов Н.С., кандидат физико-математических наук, с.н.с. БЦНИИИ;
15. Андреев А.В., кандидат физико-математических наук, с.н.с. БЦНИИИ;
16. Яковлев Л.В., аспирант МГУ им. М. В. Ломоносова, н.с. БЦНИИИ;
17. Сыров Н.В., аспирант МГУ им. М. В. Ломоносова, н.с. БЦНИИИ;
18. Куц А.А., аспирант СГТУ им. Гагарина Ю.А., м.н.с. БЦНИИИ;
19. Пицик Е.Н., м.н.с. БЦНИИИ.

Рецензенты диссертации:

1. Лобов С.А., доктор физико-математических наук, с.н.с. БЦНИИИ;
2. Казанцев В.Б., доктор физико-математических наук, доцент, в.н.с. БЦНИИИ.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение.

## Заключение

Диссертация Пицик Елены Николаевны посвящена исследованию характеристик электрической активности головного мозга во время выполнения движений и сенсомоторной интеграции, а также изучению возрастных изменений функционирования сенсомоторной системы головного мозга на основе рекуррентного анализа сигналов электроэнцефалограммы (ЭЭГ).

**Соответствие специальности.** Содержание диссертации соответствует специальности 1.5.2 «Биофизика» (физико-математические науки), удовлетворяя паспорту данной специальности.

**Научная новизна** результатов диссертации Пицик Е.Н. заключается в следующем.

- Исследованы динамические характеристики электрической активности головного мозга человека, связанных с выполнением движений, с помощью рекуррентного анализа сигналов ЭЭГ.

- На основе характеристик сложности сигналов ЭЭГ, связанных с процессом сенсомоторной интеграции, был разработан способ классификации движений левой и правой рукой, основанной на контралатеральности мер рекуррентного анализа, позволяющий различать два типа движений в зависимости от значений сложности сигналов ЭЭГ в разных полушариях мозга.

- Был разработан способ детектирования вызванного потенциала Р300 на основе рекуррентного времени. Показано, что предлагаемый способ детектирования позволяет выявить потенциал Р300 на отдельных записях ЭЭГ в случаях, когда традиционный способ оказывается неэффективным.

- Было выявлено влияние здорового старения на время нейронной реакции на совершение движения, заключающееся в снижении скорости возникновения связанной с событием десинхронизации  $\mu$ - (8-14 Гц) и  $\beta$ -ритмов (15-25 Гц) с возрастом, а также следующее за ним возникновение амбидекстрии у людей пожилого возраста.

- Была установлена зависимость между сложностью сигналов ЭЭГ в период времени, предшествующей движению, и выраженностью двигательного паттерна у молодых ( $25.5 \pm 5.2$  лет) и пожилых ( $65 \pm 7.1$  лет) испытуемых. Было показано, что сложность постстимульных сигналов ЭЭГ, посчитанная с помощью рекуррентного анализа, снижается с возрастом и связана с менее выраженной десинхронизацией  $\mu$ -ритма ЭЭГ во время выполнения движений.

- Был разработан способ восстановления сети функциональных связей головного мозга на основе искусственной нейронной сети. Показано, что выполнение движений в группе пожилых испытуемых связано с усилением связей между областями в интервалы времени, соответствующие движениям, в  $\theta$  (4-8 Гц) и  $\mu$  (8-14 Гц) диапазоне.

**Практическая значимость** обусловлена возможностью использования мер рекуррентного анализа для классификации двух типов движений с использованием сигналов ЭЭГ сенсомоторной коры мозга благодаря выраженной контралатеральности характеристик сложности электрической активности

головного мозга. Данные меры могут быть использованы для создания работающего в реальном времени классификатора для управления экзоскелета. Кроме того, показана возможность детектирования потенциала Р300 на отдельных фрагментах записи ЭЭГ с помощью мер рекуррентного анализа. Данные алгоритмы могут быть использованы для разработки интерфейса мозг-компьютер для нейрореабилитации двигательных функций.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

**1.** Сигнал ЭЭГ, записанный во время выполнения человеком движений правой и левой рукой, демонстрирует значительное снижение сложности во временной интервал, соответствующий выполнению движения, причём значения мер рекуррентного анализа являются контралатеральными, то есть различными в правом и левом полушариях сенсомоторной коры мозга при движении разными руками.

**2.** Здоровое старение связано со снижением скорости нейронной реакции на совершаемое движение в  $\beta$  (15-25 Гц) и  $\mu$ -ритмах (8-14 Гц), что ведёт к развитию возрастной амбидекстрии у пожилых людей. Фаза начала движения у пожилых людей связано с всплеском нейронной активности в  $\theta$ -ритме (4-8 Гц) в центральной, центрально-теменной и теменной области мозга, что указывает на различные стратегии использования когнитивных ресурсов в двух возрастных группах.

**3.** Сложность  $\mu$ -ритма сигналов активности головного мозга в период, предшествующий движению, коррелирует с выраженностью связанной с событием десинхронизации  $\mu$ -ритма (для меры детерминизма  $r_{AY}=-0.7$ ,  $p=0.0002$ ,  $R^2=0.6$ , для меры энтропии рекуррентного времени  $r_{AY}=0.7$ ,  $p=0.0013$ ,  $R^2=0.5$ ), причём возрастное снижение сложности сигналов ЭЭГ связано с менее выраженным двигательным частотно-временным паттерном.

**4.** Возникновение вызванного потенциала Р300, сопровождается увеличением сложности сигналов ЭЭГ. Мера сложности, основанная на рекуррентном времени, позволяет осуществлять детектирование потенциала Р300 на отдельных фрагментах записи ЭЭГ в реальном времени.

**Личный вклад.** Все включенные в диссертацию результаты по вынесенной в название тематике получены лично автором. Автором производилась разработка программного обеспечения для экспериментальных исследований, выбор подходов к анализу сигналов ЭЭГ, разрабатывались программы для предобработки нейрофизиологических сигналов, реализовывались методы выделения характерных особенностей сигналов. Постановка задач, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялась совместно с научным руководителем и другими соавторами совместно опубликованных работ.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием методов и подходов, которые строго обоснованы, апробированы и широко обсуждены в современной научной литературе и при проведении научных

исследований. Достоверность результатов подтверждается их соответствием современным биофизическим и нейронаучным представлениям, верификацией при статистическом тестировании, отсутствием противоречий достоверно известным результатам, а также сопоставлением различных подходов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 8th and 9th International Symposium on Recurrence Plots (2019, Берлин; 2020, Люблин), 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, Innopolis, Russia, 2019), Scientific School «Dynamics of Complex Networks and their Applications» (DCNA'2021, Калининград, 2021); International Conference «Nonlinearity, Information and Robotics» (NIR-2020, Innopolis, 2020), VII, VIII, IX Симпозиум по оптике и биофотонике (SFM 2019, SFM 2020, SFM 2021, Саратов, 2019, 2020, 2021), XXXII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2021»), III International Conference «Volga Neuroscience Meeting 2021» (VNM 2021, Нижний Новгород, 2021).

**Научные публикации.** Основное содержание и результаты диссертации отражены в 25 публикациях автора, из них 10 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, 11 тезисов в трудах всероссийских и международных конференций индексируемых в системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и 1 свидетельство о регистрации патента на изобретение. Список основных работ автора, отражающих существо диссертационной работы, приведен в конце автореферата. Материалы диссертации полностью представлены в опубликованных работах.

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

- 1) Pitsik E.N., Frolov N.S., Shusharina N., Hramov A.E. Age-Related Changes in Functional Connectivity during the Sensorimotor Integration Detected by Artificial Neural Network // Sensors. 2022. Vol. 22, No. 22.
- 2) Пицик Е.Н. Рекуррентный анализ потенциала Р300 на одиночных временных рядах ЭЭГ // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86, № 86, С. 276–281.
- 3) Guyo G.A., Pavlov A.N., Pitsik E.N., Frolov N.S., Badarin A.A., Grubov V.V., Pavlova O.N., Hramov A.E. Cumulant analysis in wavelet space for studying effects of aging on electrical activity of the brain // Chaos, Solitons and Fractals. 2022. V. 158.
- 4) Пицик Е.Н. Рекуррентный анализ сложности предстимульных сигналов ЭЭГ и их связь с возрастными изменениями в двигательной активности мозга // Известия вузов. ПНД. 2021. Т. 29, № 29, С. 386-397.

- 5) Pavlov A., Pitsik E.N., Guyo G.A., Frolov N.S., Grubov V.V., Pavlova O.N., Wang Z., Hramov A.E. Effects of healthy aging on electrical activity of the brain during motor tasks characterized with wavelets // *The European Physical Journal Plus*. -- 2021. -- V. 136. -- N. 136.
- 6) Frolov N.S., Pitsik E.N., Maksimenko V.A., Grubov V.V., Kiselev A.R., Wang Z., Hramov A.E. Age-related slowing down in the motor initiation in elderly adults // *PLoS ONE*. 2020. Vol. 15, No. 15.
- 7) Pitsik E., Frolov N., Kraemer K.H., Grubov V., Maksimenko V., Kurths J., Hramov A. Motor execution reduces EEG signals complexity: Recurrence quantification analysis study // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2020. Vol. 30, № 30.
- 8) Pavlov A.N., Pitsik E.N., Frolov N.S., Badarin A., Pavlova O.N., Hramov A.E. Age-Related Distinctions in EEG Signals during Execution of Motor Tasks Characterized in Terms of Long-Range Correlations // *Sensors*. -- 2020. V. 20. N. 20.
- 9) Pitsik E., Frolov N. Recurrence plot structures reflect motor-related EEG pattern // *Cybernetics and physics*. 2019. Vol. 8, No. 8, Pp. 282–286.
- 10) Maksimenko V.A., Kurkin S.A., Pitsik E.N., Musatov V.Yu., Runnova A.E., Efremova T.Yu., Hramov A.E., Pisarchik A.N. Artificial Neural Network Classification of Motor-Related EEG: An Increase in Classification Accuracy by Reducing Signal Complexity // *Complexity*. -- 2018. -- N. 9385947.

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

- 11) Pitsik E., Frolov N. Recurrence quantification analysis detects P300 on single-trial EEG // 2021 5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). 2021. Pp. 155-158.
- 12) Frolov N., Pitsik E. Changes in cortical activation during single-session sensorimotor training: young versus elderly adults // 2021 5th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). 2021. Pp. 73-74.
- 13) Frolov N., Pitsik E. Age-related changes in the brain functional connectivity during motor initiation // *Proc. SPIE*. 2021. Vol. 11847, No. 118470V.
- 14) Pitsik E., Frolov N. Artificial neural network predicts inter-areal functional connectivity // *Proc. SPIE*. 2021. Vol. 11847, No. 118470U.
- 15) Pitsik E., Frolov N., Kiselev A., Shchukovskii N., Badarin A., Grubov V. Motor-related elderly brain activity revealed via recurrence quantification analysis // 2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR). 2020.
- 16) Pitsik E., Frolov N., Badarin A., Grubov V. Network analysis of electrical activity in brain motor cortex during motor execution and motor imagery of elderly // 2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR). 2020.
- 17) Pitsik E., Frolov N. Detecting inter-areal functional connectivity using artificial neural network // 2020 4th Scientific School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). 2020. Pp. 186-188.

- 18) Pitsik E., Frolov N. Features of motor-related brain activity revealed via recurrence quantification analysis // Proc. SPIE. 2020. Vol. 11459, No. 1145904.
- 19) Pitsik E., Frolov N. Network analysis of electrical activity in brain motor cortex during motor execution and motor imagery // Proc. SPIE. 2020. Vol. 11459, No. 1145908.
- 20) Pitsik E. Recurrence plot structure of motor-related human EEG // 2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). 2019. Pp. 139-141.
- 21) Pitsik E. Time-frequency and recurrence quantification analysis detect limb movement execution from EEG data // 2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). Pp. 142-144.

#### *Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ*

- 22) Пицик Е.Н., Фролов Н.С. Программа для детектирования потенциала Р300 на одиночных записях ЭЭГ на основе рекуррентного анализа. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665773, 2021.
- 23) Пицик Е.Н., Фролов Н.С. Программа для классификации моторной активности головного мозга для применения в постинсультной реабилитации на основе рекуррентного анализа сигналов ЭЭГ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665287, 2019.
- 24) Пицик Е.Н., Фролов Н.С. Программа для вычисления мер количественного анализа рекуррентных диаграмм вейвлетной энергии мю-ритма многоканальных ЭЭГ-сигналов, соответствующих реальным движениям руки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661002, 2019.

#### *Патенты*

- 25) Пицик Е.Н., Фролов Н.С., Куркин С.А., Храмов А.Е. Способ классификации двигательной активности человека. Патент на изобретение No 2571816, 2021 // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС 19.07.2021 01.09.2021.

**Общая оценка диссертации.** Диссертация Пицик Елены Николаевны «Особенности и возрастные изменения сенсомоторной интеграции в мозге человека: рекуррентный анализ ЭЭГ» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.5.2 – «Биофизика» представляет собой самостоятельное, целостное исследование, направленное на решение актуальной биофизической научной задачи, заключающейся в изучении особенностей сенсомоторной интеграции в мозге человека, а также возрастных изменений функционирования сенсомоторной коры мозга, выявляемым с помощью рекуррентного анализа сложности сигналов электроэнцефалограммы. Диссертационная работа выполнена на высоком уровне с применением

актуальной биофизической научной задачи, заключающейся в изучении особенностей сенсомоторной интеграции в мозге человека, а также возрастных изменений функционирования сенсомоторной коры мозга, выявляемым с помощью рекуррентного анализа сложности сигналов электроэнцефалограммы. Диссертационная работа выполнена на высоком уровне с применением современных методов теоретического и экспериментального исследования. Положения и основные результаты диссертационной работы полностью отражены в опубликованных статьях и материалах научных конференций. Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации 24.09.2013 № 842.

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.5.2 – «Биофизика».

Заключение принято на заседании научно-технического совета Института живых систем ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта».

Присутствовало на заседании 7 докторов и 8 кандидатов физико-математических и технических наук, всего 19 человек.

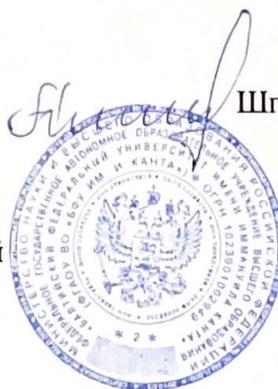
Результаты голосования: «за» – 19 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет. (протокол № 1 от «31» мая 2022 г.)

Руководитель Балтийского центра нейротехнологий и искусственного интеллекта ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», кандидат педагогических наук

Шушарина Наталья Николаевна

236041, Россия, Калининград,  
ул. Александра Невского, 14  
+7 (4012) 59-55-95  
[hramovae@gmail.com](mailto:hramovae@gmail.com)

Подпись  
Шушариной Натальи Николаевны  
заверяю:  
Ответственный секретарь Ученого Совета  
ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный  
университет имени Иммануила Канта»



Шпилевой А.А.