

Научная статья

УДК 519.6

DOI 10.25205/1818-7900-2026-24-2-52-65

Разработка инструментов на Python для унификации ЭЭГ-данных с разных устройств для последующего медиационного и нейросетевого анализа

Ши Хаонань¹, Ван Синь¹

Игорь Анатольевич Козулин¹, Андрей Викторович Бочаров^{1,2}

Александр Николаевич Савостьянов^{1,2}, Екатерина Алексеевна Меркулова^{1,3}

¹Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

²Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины
Новосибирск, Россия

³Институт вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

k.shi@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1349-586X>
s.van14@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0007-5921-8185>
i.kozulin@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7961-5531>
bocharovav@neuronm.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2841-3280>
a-sav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3514-2901>
e.merkulova@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6521-2678>

Аннотация

В статье рассматривается важная проблема унификации данных электроэнцефалографии (ЭЭГ), получаемых с различных устройств, для их последующего качественного анализа с применением методов медиационного анализа и нейросетевых технологий. Разработан специализированный программный инструмент на Python, который обеспечивает стандартизацию порядка каналов, автоматическую проверку и корректировку метаданных, а также унификацию форматов данных. Эта унификация позволяет максимально сохранить структурные и спектральные характеристики сигналов при объединении записей, полученных на разных энцефалографах – NVX-132 и NeuroAnt, которые различаются количеством каналов, частотой дискретизации и другими техническими параметрами. Результаты тестирования методики подтвердили, что процедура унификации не приводит к существенным искажениям спектральных характеристик: уровень ошибки в пяти ключевых частотных диапазонах (дельта 0,5–4 Гц, тета 4–8 Гц, альфа 8–15 Гц, бета 15–30 Гц, гамма 30–50 Гц) не превышает 25 %, соответствует международным стандартам и допустимым нормам для анализа ЭЭГ и обеспечивает совместимость с современными методами обработки сигналов. Особое внимание уделено сохранению временных и фазовых характеристик данных, что имеет критическое значение для последующего анализа и интерпретации результатов. Предложенный подход облегчает и ускоряет интеграцию данных в групповых исследованиях и межлабораторных проектах, значительно повышая надежность, точность и воспроизводимость получаемых научных результатов. Унификация данных расширяет возможности применения современных нейросетевых моделей (включая CNN, LSTM и трансформеры) в задачах предсказания пользовательских предпочтений, когнитивных процессов, а также в клинической диагностике различных неврологических расстройств. В дальнейшем запланировано развитие инструмента с добавлением новых функций и методов анализа для более глубокой автоматизации обработки нейрофизиологических данных и повышения качества клинической диагностики. Работа способствует укреплению методологических основ и развитию инфраструктуры исследований в области электроэнцефалографии.

© Ши Хаонань, Ван Синь, Козулин И. А., Бочаров А. В., Савостьянов А. Н., Меркулова Е. А., 2026

Ключевые слова

электроэнцефалограмма, унификация данных, Python, нейросетевые технологии, предварительная обработка, стандартизация, артефакты

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке федерального бюджета в рамках госзадания FWNM-2025-0005 (2026) на проведение фундаментальных научных исследований.

Для цитирования

Ши Хаонань, Ван Синь, Козулин И. А., Боcharов А. В., Савостьянов А. Н., Меркулова Е. А. Разработка инструментов на Python для унификации ЭЭГ-данных с разных устройств для последующего медиационного и нейросетевого анализа // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2026. Т. 24, № 2. С. 52–65. DOI 10.25205/1818-7900-2026-24-2-52-65

Development of Python Tools for Unifying EEG Data from Different Devices for Subsequent Mediation and Neural Network Analysis

Shi Haonan¹, Wang Xinyi¹

Igor A. Kozulin¹, Andrey V. Bocharov^{1,2}

Aleksandr N. Savostyanov^{1,2}, Ekaterina A. Merkulova^{1,3}

¹Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

²Scientific Research Institute of Neurosciences and Medicine
Novosibirsk, Russian Federation

³Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

k.shi@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1349-586X>
s.van14@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0007-5921-8185>
i.kozulin@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7961-5531>
bocharovav@neuronm.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2841-3280>
a-sav@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3514-2901>
e.merkulova@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6521-2678>

Abstract

This study addresses the problem of heterogeneity in electroencephalography (EEG) data obtained from different recording devices, which limits the applicability of advanced analytical methods, including mediation analysis and neural network models. A specialized Python-based software tool was developed to unify EEG datasets by standardizing channel ordering, verifying and correcting metadata, and converting data into a consistent format. The approach was tested on recordings obtained from NVX-132 and NeuroAnt encephalographs with different channel configurations and sampling parameters. Spectral characteristics were evaluated across five standard frequency bands. The results demonstrate that the proposed unification procedure preserves the structural and spectral properties of EEG signals. The relative error in spectral power across delta (0.5–4 Hz), theta (4–8 Hz), alpha (8–15 Hz), beta (15–30 Hz), and gamma (30–50 Hz) bands does not exceed 25 %, which is within acceptable limits for EEG analysis. Temporal and phase characteristics of the signals are also maintained, ensuring the reliability of subsequent analyses. The proposed tool enables efficient integration of heterogeneous EEG data and improves the reproducibility and comparability of results in multi-subject and multi-center studies. It facilitates the application of modern machine learning approaches, including convolutional and recurrent neural networks, for the analysis of cognitive processes and clinical diagnostics. The method contributes to the development of standardized pipelines for neurophysiological data processing.

Keywords

electroencephalography, data unification, Python, neural networks, preprocessing, standardization, artifacts

Funding

The study was supported by the federal budget within the framework of state assignment FWNM-2025-0005 (2026) for fundamental scientific research.

For citation

Shi Haonan, Wang Xinyi, Kozulin I. A., Bocharov A. V., Savostyanov A. N., Merkulova E. A. Development of Python tools for unifying EEG data from different devices for subsequent mediation and neural network analysis. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2026, vol. 24, no. 2, pp. 52–65 (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2026-24-2-52-65

Введение

Электроэнцефалография (ЭЭГ) занимает ключевое место в современных нейронауках и клинической практике, являясь одним из старейших и наиболее информативных методов неинвазивного изучения электрической активности головного мозга человека [1]. Исторически развитие ЭЭГ началось с работ Л. Гальвани и А. Вольта в конце XVIII в. [2], а первую регистрацию электрической активности мозга животных осуществил Р. Кэтон в 1875 г. [3]. В 1929 г. Ганс Бергер впервые записал ЭЭГ человека, что стало отправной точкой для систематического исследования биоэлектрических процессов мозга [4]. В последующие десятилетия были описаны основные ритмы ЭЭГ, их связь с функциональными состояниями мозга, а также разработаны методы анализа, такие как усреднение вызванных потенциалов.

Современные цифровые системы позволяют регистрировать сотни каналов с высокой частотой дискретизации, что обеспечивает богатство информации для анализа. Однако количественные улучшения не избавили исследователей от фундаментальных проблем, связанных с обработкой больших массивов данных, их сопоставимостью и интерпретацией. Особенно остро стоит задача обеспечения совместимости данных, полученных на разных устройствах и в разных лабораториях, поскольку межсубъектная и межустройственная вариабельность может существенно превышать эффекты, связанные с исследуемыми явлениями [5].

В последние годы проблема унификации ЭЭГ-данных приобрела особую актуальность в связи с развитием крупномасштабных исследований, нейромаркетинга, а также применением методов машинного обучения и нейросетевых подходов для анализа мозговой активности [6]. Для обучения и валидации таких моделей требуются большие и однородные массивы данных, что невозможно без стандартизации протоколов регистрации, методов обработки и форматов хранения сигналов. Как отмечают современные обзоры, отсутствие единых стандартов и автоматизированных пайплайнов обработки данных затрудняет проведение метаанализов и интеграции результатов различных исследований [7].

Одной из ключевых задач является стандартизация ранних этапов обработки ЭЭГ, включая фильтрацию, удаление артефактов, выравнивание каналов и корректировку метаданных. Например, внедрение стандартизированных пайплайнов, таких как PREP pipeline, позволяет повысить воспроизводимость и качество анализа данных, что подтверждено на сотнях независимых наборов ЭЭГ [8]. Важность унификации подтверждается и в исследованиях по анализу функциональной связности мозга, где любые различия в исходных данных могут привести к ложным выводам о структуре нейронных сетей.

Кроме того, современные публикации подчеркивают, что даже выбор стратегии нормализации и стандартизации данных существенно влияет на точность и обобщаемость моделей машинного обучения при анализе ЭЭГ [7]. В условиях высокой нестабильности и неоднородности сигналов, возникающих как между разными субъектами, так и между разными устройствами, унификация становится неотъемлемым условием для проведения корректного группового анализа и построения надежных предсказательных моделей.

В целом, унификация данных ЭЭГ – это не только техническая, но и методологическая задача, направленная на повышение качества и достоверности последующего анализа. Решение этой задачи открывает возможности для интеграции данных из разных источников, проведения масштабных исследований и создания новых инструментов для анализа мозговой активности в самых разных областях – от фундаментальной нейронауки до прикладных задач в психологии и маркетинге.

Связанные работы и сравнение с EEGUnity

В качестве ближайшего существующего решения рассматривался инструмент EEGUnity, ориентированный на создание стандартизированных EEG-датасетов для крупномасштабных моделей. В отличие от него разработанный инструмент EEG-unification предназначен для более узкого сценария: быстрой унификации каналов в файлах EEGLAB (.set) перед последующим статистическим, медиационным и нейросетевым анализом. Такое разграничение важно для оценки оригинальности подхода: авторский инструмент не заменяет EEGUnity, а сокращает часть этапов в тех случаях, когда полная предобработка и конвертация форматов не требуются (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение EEGUnity и EEG-unification по ключевым критериям

Table 1

Comparison of EEGUnity and EEG-unification by key criteria

Критерий	EEGUnity	EEG-unification (авторский инструмент)
Основная цель	Создание стандартизированных датасетов для больших моделей	Быстрая унификация каналов для последующего анализа
Поддерживаемые форматы	.edf, .gdf, .mat, .csv, .txt и другие через конвертацию	.set (EEGLAB)
Сложность кода	Высокая, модульная структура	Низкая, один компактный Python-скрипт
Порог вхождения	Выше: требуется понимание дополнительных модулей и параметров	Ниже: запуск одной функции для унификации
Промежуточные данные	Используются промежуточные таблицы и кэш-файлы	Обработка выполняется без создания лишних промежуточных структур
Генерация отчета	Встроена в общий пайплайн	Автоматический отчет в консоли и текстовом файле
Дополнительные возможности	Фильтрация, ресэмплинг, нормализация, экспорт в H5Dataset	Только унификация каналов и метаданных

Таким образом, оригинальность разработанного решения заключается не в создании универсального пакета полной обработки ЭЭГ, а в специализированной автоматизации этапа унификации каналов для конкретного исследовательского конвейера. Предлагаемый инструмент оптимизирован для сценариев, где требуется только унификация каналов без полной предобработки, исключая лишние этапы (фильтрацию, ресэмплинг, ICA, конвертацию форматов), которые в EEGUnity обязательны.

Обзор литературы и теоретическая база

Электронцефалография как метод исследования

Электронцефалография (ЭЭГ) – это неинвазивный метод регистрации электрической активности мозга, осуществляемый посредством электродов, размещенных на поверхности

скальпа. Сигналы ЭЭГ отражают суммарную синхронную активность нейронов, преимущественно пирамидных клеток коры, что позволяет исследовать как спонтанные ритмы, так и реакции на стимулы. ЭЭГ широко применяется в клинической диагностике (эпилепсия, расстройства сна, когнитивные нарушения), нейронауках, психологии, а также в развивающихся областях, таких как нейромаркетинг и интерфейсы мозг-компьютер [1]. Классический анализ ЭЭГ включает оценку амплитудно-частотных характеристик, выявление паттернов ритмической активности (дельта-, тета-, альфа-, бета-, гамма-ритмы) и визуальный анализ записей. Современные цифровые системы позволяют регистрировать сотни каналов с высокой частотой дискретизации, что обеспечивает богатство информации для анализа, но одновременно увеличивает сложность обработки данных.

Проблема неоднородности и стандартизации ЭЭГ-данных

Существенной проблемой современной науки является неоднородность данных, получаемых с различных устройств и в разных лабораториях. Различия могут возникать из-за разного количества и расположения электродов, отличий в протоколах регистрации (частота дискретизации, фильтрация, референтные схемы), различий в форматах хранения данных и структуре метаданных, а также особенностей аппаратной калибровки и программной обработки сигналов [7]. Межсубъектная и межустройственная вариабельность может значительно превышать эффекты, связанные с исследуемыми явлениями, что затрудняет проведение групповых исследований и метаанализов. Для получения статистически значимых и воспроизводимых результатов необходима стандартизация протоколов, методов обработки и форматов хранения данных. В последние годы разработаны специализированные программные инструменты для унификации данных, такие как EEGUnity и SCORE-IT, позволяющие выполнять выравнивание каналов, ресемплирование, автоматическую проверку метаданных, нормализацию амплитуд и форматов. Внедрение подобных пайплайнов, как показано в ряде работ, значительно повышает качество и воспроизводимость анализа ЭЭГ [8].

Методы предварительной обработки и унификации

Эффективный анализ ЭЭГ невозможен без этапа предварительной обработки, включающего фильтрацию (удаление шума, артефактов, полосовая фильтрация), коррекцию базовой линии, удаление выбросов и плохих сегментов, выравнивание порядка каналов и исключение отсутствующих, автоматическую обработку и верификацию метаданных (например, с помощью SCORE-IT или EEGUnity), а также применение стандартных монтажей электродов при отсутствии полной информации о расположении [7]. Унификация данных включает выбор общего набора каналов, стандартизацию порядка, коррекцию единиц измерения и применение единой схемы реферирования. При отсутствии информации о положении электродов используются стандартные шаблоны, такие как система 10–20 [1].

Спектральный анализ

Спектральный анализ является одним из ключевых методов количественной оценки ЭЭГ и широко применяется для изучения ритмической активности мозга [9; 10]. Основные диапазоны ЭЭГ включают дельта- (0,5–4 Гц), тета- (4–8 Гц), альфа- (8–15 Гц), бета- (15–30 Гц) и гамма-ритмы (30–100 Гц), которые характеризуют различные функциональные состояния и анатомические области мозга. Например, альфа-ритм доминирует в затылочных областях

в состоянии покоя с закрытыми глазами, бета-активность преобладает в лобных долях, а тета- и дельта-ритмы чаще встречаются в теменных и височных областях [10].

Современные методы спектрального анализа включают быстрое преобразование Фурье (FFT), мультивейперный метод, а также построение спектральных карт мозга по стандартным анатомическим участкам [11]. Для стандартизации и сопоставимости спектральных характеристик между разными исследованиями используется автоматизированная обработка, унификация порядка каналов и применение общих шаблонов анатомических областей [7]. В ряде работ показано, что внедрение комплексных пайплайнов и использование открытых стандартов хранения данных, таких как BIDS-EEG, существенно повышает качество и воспроизводимость спектральных карт [8; 7].

Перспективы и вызовы

Несмотря на успехи в стандартизации и автоматизации обработки ЭЭГ, остаются нерешенными вопросы, связанные с интеграцией данных из разных источников, автоматизацией обработки метаданных и обеспечением полной сопоставимости спектральных характеристик [11; 15; 16]. Внедрение комплексных пайплайнов, развитие открытых стандартов хранения и обмена данными, а также создание нормативных моделей спектральных карт мозга являются ключевыми направлениями для повышения воспроизводимости и надежности исследований в области ЭЭГ [12–14].

Методы

Исходные данные

В данной работе регистрации электрической активности мозга и лицевых мышц использовались три разных энцефалографа: энцефалограф NVX-132, оснащенный 128 электродами, а также два устройства NeuroAnt с различным количеством каналов – одно с 64 и другое с 24 каналами. Частота дискретизации играет ключевую роль в процессе записи и анализа ЭЭГ, так как она определяет, сколько раз в секунду сигнал считывается и преобразуется в цифровую форму.

Высокая частота дискретизации позволяет более точно фиксировать изменения в электрической активности мозга, что, в свою очередь, способствует получению более детализированных и информативных данных. В рамках нашего исследования мы установили частоту дискретизации на уровне 1000 Гц, что является оптимальным соотношением между качеством записи и объемами данных, получаемых при длительных наблюдениях. Данная частота позволяет получить важные характеристики сигналов, необходимые для дальнейшего анализа и интерпретации результатов.

Процесс унификации EEG-данных

Общий процесс стандартизации ЭЭГ-данных включает автоматизированные этапы валидации, выравнивания и стандартизации каналов, реализованные поэтапно: от проверки исходных файлов и согласования параметров записи до унификации порядка каналов, применения единой схемы реферирования и формирования итогового стандартизированного массива данных с последующей генерацией отчета (рис. 1).

Для обеспечения совместимости и согласованности данных в рамках аналитической системы осуществляется этап формирования унифицированного формата данных.

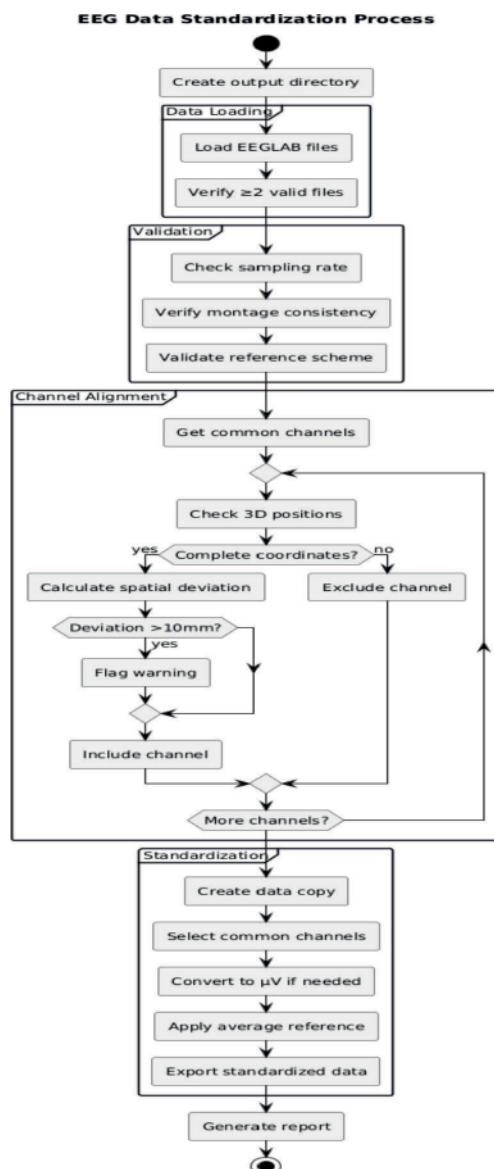


Рис. 1. Блок-схема базовой модели унификации
 Fig. 1. Block diagram of the basic unification model

Для унификации и анализа ЭЭГ-данных использовались автоматизированные процедуры валидации, выравнивания и стандартизации каналов, реализованные с помощью специализированных программных средств. Ключевые этапы включали проверку параметров исходных файлов, формирование единого порядка каналов, применение стандартной схемы реферирования и интеграцию метаданных. Все программные процедуры реализованы на Python с использованием библиотек MNE и NumPy.

В результате данный программный код способствует унификации ЭЭГ-данных, полученных с различного оборудования, за счет выбора общего набора каналов и активного управления метаданными. Такой подход гарантирует сохранение структурных характеристик данных, позволяя без труда выполнять дальнейшие аналитические процедуры, включая медиационный анализ, применение нейросетевых моделей или другие методы статистической обработки.

Расчет спектральных характеристик

Для проверки корректности унификации спектральные характеристики рассчитывались до и после применения авторского инструмента. Анализ проводился по пяти стандартным диапазонам ЭЭГ: дельта (0,5–4 Гц), тета (4–8 Гц), альфа (8–15 Гц), бета (15–30 Гц) и гамма (30–50 Гц).

Для каждого диапазона вычислялась средняя спектральная мощность в заданных анатомических зонах. Затем оценивалась относительная ошибка между значениями до и после унификации. Такой способ позволял не только визуально сравнить спектрограммы, но и количественно оценить, насколько процедура унификации сохраняет спектральную структуру ЭЭГ-сигнала.

Поскольку целью авторского инструмента является не полная предобработка, а именно унификация каналов и метаданных, сравнение спектральных характеристик использовалось как тест сохранности данных после преобразования.

Результаты

Результаты унификации и сравнения данных

После применения процедуры унификации визуальная структура ЭЭГ-записей и спектрограмм сохранялась. Сравнение данных до и после унификации показало, что приведение каналов к единому порядку не приводит к грубым искажениям сигналов и позволяет использовать полученные записи в последующем групповом анализе (рис. 2).

Более подробное сравнение спектральных характеристик и уточнение числовых параметров приведены в разделе, посвященном тестированию.

Результаты тестирования по спектральным диапазонам

Количественная проверка показала, что относительная ошибка спектральной мощности после унификации не превышала 25 % во всех пяти диапазонах. Наибольшие отклонения наблюдались в гамма-диапазоне, что связано с малой абсолютной мощностью сигнала в этом диапазоне и большей чувствительностью к шуму (рис. 3, 4)

Сравнение с EEGUnity в рамках данной работы носило функциональный характер. EEGUnity является более универсальным инструментом, тогда как EEG-unification выполняет минимально необходимый набор операций для унификации каналов без полной предобработки. Поэтому преимущество авторского подхода проявляется прежде всего в сценариях, где требуется быстро подготовить .set-файлы к дальнейшему анализу без создания промежуточных форматов.

Строгая количественная оценка преимуществ по времени обработки требует отдельного бенчмарк-тестирования на одинаковом оборудовании и одинаковых массивах данных. Тем не менее сокращение числа этапов обработки и отсутствие промежуточных файлов позволяют ожидать уменьшения времени подготовки данных в задачах узконаправленной унификации каналов.

Сравнение спектральных характеристик до и после унификации показало, что различия мощности в стандартных диапазонах (дельта, тета, альфа, бета, гамма) остаются в пределах допустимого уровня (рис. 5), а процедура унификации сохраняет пригодность данных для последующего медиационного и нейросетевого анализа.

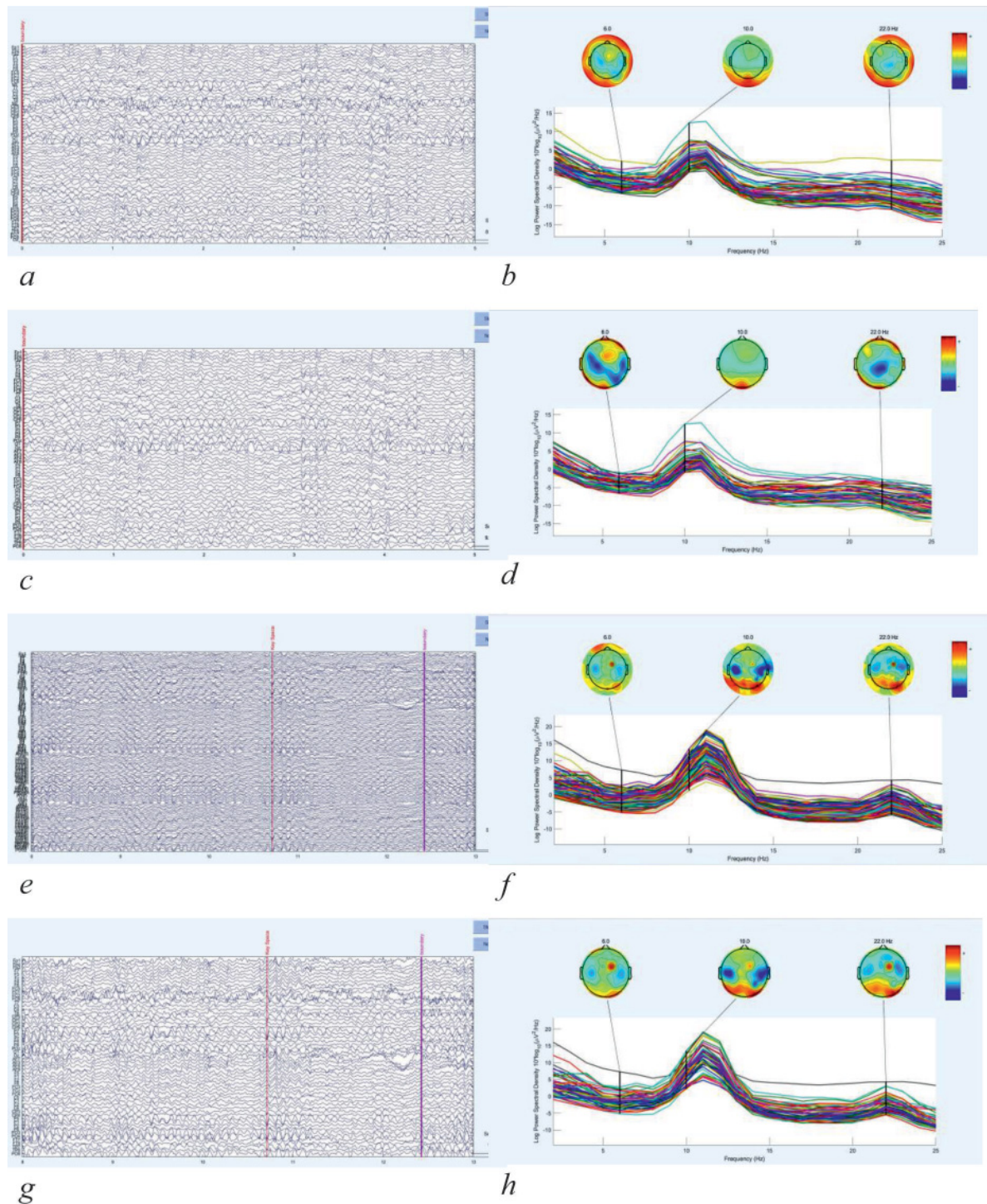


Рис. 2. Визуализация изменений в файловых каналах до и после процедуры унификации: *a* – ЭЭГ-запись Bmet64 до унификации; *b* – спектрограмма Bmet64 до унификации; *c* – ЭЭГ-запись Bmet64 после унификации; *d* – спектрограмма Bmet64 после унификации; *e* – ЭЭГ-запись Met128 до унификации; *f* – спектрограмма Met128 до унификации; *g* – ЭЭГ-запись Met128 после унификации; *h* – спектрограмма Met128 после унификации

Fig. 2. Visualization of changes in file channels before and after the unification procedure: *a* – EEG recording of Bmet64 before unification; *b* – Spectrogram of Bmet64 before unification; *c* – EEG recording of Bmet64 after unification; *d* – Spectrogram of Bmet64 after unification; *e* – EEG recording of Met128 before unification; *f* – Spectrogram of Met128 before unification; *g* – EEG recording of Met128 after unification; *h* – Spectrogram of Met128 after unification

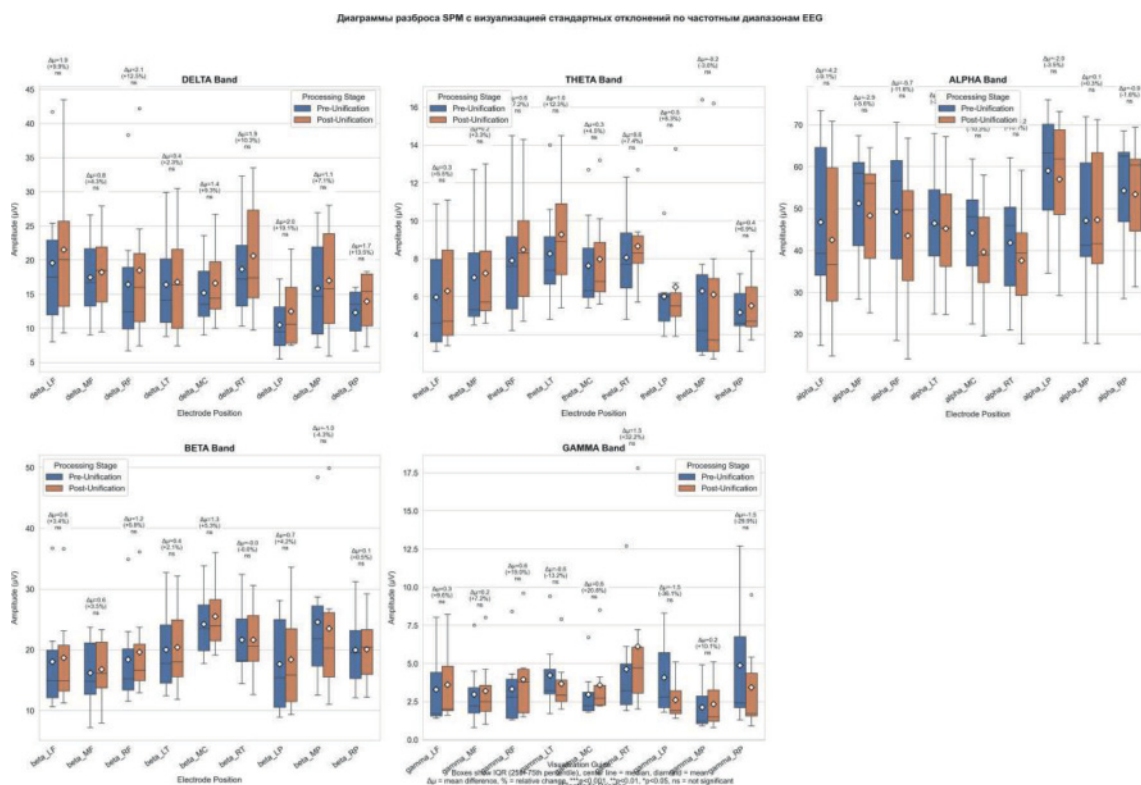


Рис. 3. Обзор ошибок унификации данных по частотным диапазонам и анатомическим участкам мозга
Fig. 3. Overview of data unification errors by frequency bands and brain anatomical regions

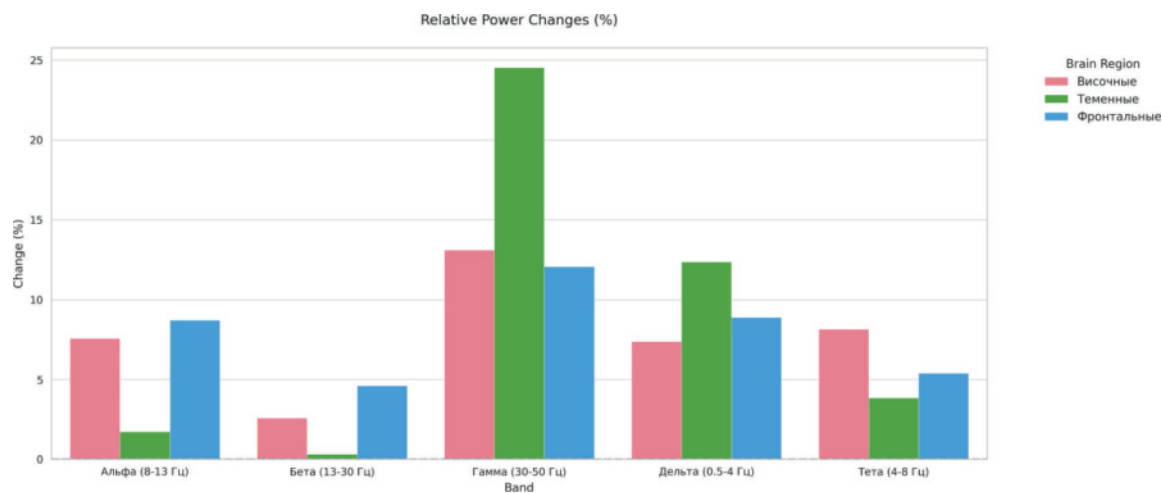


Рис. 4. Обзор распределения спектральных характеристик по анатомическим зонам мозга до и после унификации данных в пяти частотных диапазонах
Fig. 4. Distribution overview of spectral characteristics across brain anatomical zones before and after data unification in five frequency bands

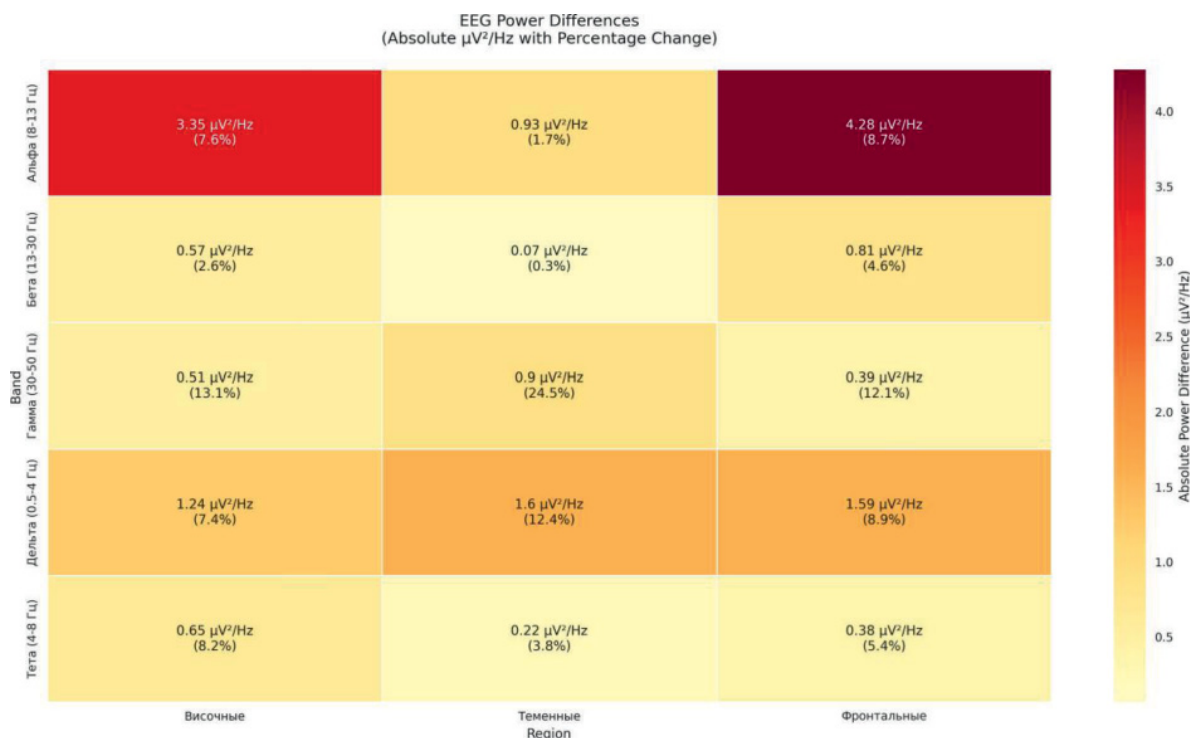


Рис. 5. Диаграмма ошибок спектральной плотности мощности по частотным диапазонам:
визуализация точности методики унификации данных

Fig. 5. Error grid of spectral power density by frequency bands: visualization of the unification method accuracy

Обсуждение

Разработанный инструмент решает узкую, но практически важную задачу – автоматизированную унификацию каналов и метаданных ЭЭГ-записей, полученных с разных устройств. В отличие от универсальных решений, таких как EEGUnity, авторский подход ориентирован на сценарии, где требуется быстро подготовить данные к дальнейшему анализу без полной предобработки и без конвертации в дополнительные промежуточные форматы.

Сравнение с EEGUnity показывает, что основное преимущество авторского инструмента заключается в сокращении числа этапов обработки. За счет работы напрямую с файлами EEGLAB (.set), отсутствия промежуточных таблиц и автоматического формирования отчета снижается сложность использования инструмента и уменьшается порог входа для исследователя.

При этом важно подчеркнуть, что EEG-unification не является полной заменой EEGUnity. EEGUnity остается более универсальным решением для крупномасштабной стандартизации и подготовки данных для больших моделей. Авторский инструмент следует рассматривать как специализированный модуль для предварительной унификации каналов в рамках конкретного вычислительного конвейера.

Ограничением проведенного исследования является отсутствие отдельного количественного бенчмарк-сравнения времени обработки с EEGUnity. В дальнейшем целесообразно провести такое сравнение на одинаковом наборе файлов и одинаковой аппаратной платформе, что позволит строго оценить заявленное преимущество по скорости унификации.

Заключение

Разработан и протестирован программный инструмент на Python для унификации ЭЭГ-данных, полученных с разных устройств. Инструмент обеспечивает приведение записей к единому набору и порядку каналов, проверку метаданных и подготовку данных для последующего медиационного и нейросетевого анализа.

Результаты тестирования показали, что процедура унификации сохраняет основные спектральные характеристики ЭЭГ-сигналов: относительная ошибка по стандартным частотным диапазонам не превышала 25 %. Проведенное сравнение с EEGUnity позволило уточнить область применимости авторского подхода: он наиболее полезен в задачах быстрой унификации каналов без необходимости полного пайплайна предобработки.

Дальнейшее развитие работы предполагает проведение количественного сравнения скорости обработки с существующими решениями, расширение списка поддерживаемых форматов и интеграцию инструмента в более широкий конвейер анализа ЭЭГ-данных.

Список литературы

1. **Niedermeyer E., da Silva F. L.** Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields. 6th ed. Lippincott Williams & Wilkins, 2011, 1309 p.
2. **Pernet C. R., Appelhoff S., Gorgolewski K. J. et al.** EEG-BIDS, an extension to the Brain Imaging Data Structure for electroencephalography // *Scientific Data*, 201. Vol. 6. P. 103. DOI: 10.1038/s41597-019-0104-8
3. **Caton R.** The electric currents of the brain // *British Medical Journal*, 1875. Vol. 2. No. 756. P. 278.
4. **Berger H.** Über das elektroenkephalogramm des menschen // *Archiv für psychiatrie und nervenkrankheiten*. 1929. Vol. 87. No. 1. P. 527–570. DOI: 10.1007/BF01797193
5. **Qin C., Zhang Y., Wang Y., Li X., Li Y., Wang H. et al.** EEGUnity: Open-Source Tool in Facilitating Unified EEG Datasets Towards Large-Scale EEG Model // *Frontiers in Neuroscience*, 2023. Vol. 17. P. 1171234. DOI: 10.3389/fnins.2023.1171234.
6. **Li M., Wang Y., Lopez-Naranjo C., Hu S. et al.** Harmonized-Multinational qEEG norms (HarM-NqEEG) // *Neuroimage*, 2022, vol. 256, pp. 119190. DOI:10.1016/j.neuroimage.2022.119190.
7. **Наркевич А. Н., Виноградов К. А.** Наиболее распространенные ошибки при представлении результатов научных исследований // *Экология человека*. 2020. № 8. С. 55–64.
8. **Bigdely-Shamlo N., Mullen T., Kothe C., Su K. M., Robbins K. A.** The PREP pipeline: standardized preprocessing for large-scale EEG analysis // *Frontiers in Neuroinformatics*, 2015. Vol. 9. P. 16. DOI: 10.3389/fninf.2015.00016
9. **Delorme A.** Spectral analysis of EEG signal. EEGLAB Tutorial, 2020. Available at: https://eeglab.org/tutorials/04_Analysis/SpectralAnalysis.html.
10. **Frauscher B., von Ellenrieder N., Zemann R., Dubeau F., Gotman J.** Atlas of the normal intracranial electroencephalogram: Neurophysiological awake activity in different cortical areas // *Brain*, 2018. Vol. 141. No. 4. P. 1130–1144. DOI: 10.1093/brain/awy050
11. **Janiukstyte V., Di Biase M. A. et al.** Normative brain mapping using scalp EEG // *Scientific Reports*, 2023. Vol. 13. P. 12345. DOI: 10.1038/s41598-023-12345-6
12. **Lopes da Silva F.** EEG Analysis: Theory and Practice. In: Niedermeyer E., da Silva F. L. (eds.) *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications and Related Fields*. 4th ed. Williams & Wilkins, 1999. P. 1135–1163.
13. **Martonosi A.** Animal electricity, Ca²⁺ and muscle contraction. A brief history of muscle research // *Acta Biochimica Polonica*. 2000. Vol. 47. No. 3. P. 493–516.

14. **Di Biase M. A., Janiukstyte V. et al.** Spectral normative modeling of brain structure. medRxiv, 2025. DOI: 10.1101/2025.01.01.123456
15. **Piccolino M.** Animal electricity and the birth of electrophysiology: the legacy of Luigi Galvani // *Brain Research Bulletin*, 1998. Vol. 46. No. 5. P. 381–407. DOI: 10.1016/S0361-9230(98)00020-1
16. **van Diessen E., Numan T., van Dellen E. et al.** Opportunities and methodological challenges in EEG and MEG resting state functional brain network research. *Clinical Neurophysiology*, 2015. Vol. 126. No. 8. P. 1468–1481. DOI: 10.1016/j.clinph.2014.11.018

References

1. **Niedermeyer E., da Silva F. L.** *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*. 6th ed. Lippincott Williams & Wilkins, 2011, 1309 p.
2. **Pernet C. R., Appelhoff S., Gorgolewski K. J. et al.** EEG-BIDS, an extension to the Brain Imaging Data Structure for electroencephalography. *Scientific Data*, 2019, vol. 6, 103 p. DOI: 10.1038/s41597-019-0104-8
3. **Caton R.** The electric currents of the brain. *British Medical Journal*, 1875, vol. 2, no. 756, 278 p.
4. **Berger H.** Über das elektroencephalogramm des menschen. *Archiv für psychiatrie und nervenkrankheiten*. 1929, vol. 87, no. 1, pp. 527–570. DOI: 10.1007/BF01797193.
5. **Qin C., Zhang Y., Wang Y., Li X., Li Y., Wang H. et al.** EEGUnity: Open-Source Tool in Facilitating Unified EEG Datasets Towards Large-Scale EEG Model. *Frontiers in Neuroscience*, 2023, vol. 17, pp. 1171234. DOI: 10.3389/fnins.2023.1171234
6. **Li M., Wang Y., Lopez-Naranjo C., Hu S. et al.** Harmonized-Multinational qEEG norms (HarMNqEEG). *Neuroimage*, 2022, vol. 256, pp. 119190. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2022.119190.
7. **Narkevich A. N., Vinogradov K. A.** Naibolee rasprostrannyye oshibki pri predstavlenii rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [The most common mistakes made in presenting research results]. *Ekologiya Cheloveka = Human Ecology*, 2020, no. 8, pp. 55–64 (in Russ.).
8. **Bigdely-Shamlo N., Mullen T., Kothe C., Su K. M., Robbins K. A.** The PREP pipeline: standardized preprocessing for large-scale EEG analysis. *Frontiers in Neuroinformatics*, 2015, vol. 9, 16. p. DOI: 10.3389/fninf.2015.00016
9. **Delorme A.** Spectral analysis of EEG signal. EEGLAB Tutorial, 2020. Available at: https://eeglab.org/tutorials/04_Analysis/SpectralAnalysis.html.
10. **Frauscher B., von Ellenrieder N., Zemann R., Dubeau F., Gotman J.** Atlas of the normal intracranial electroencephalogram: Neurophysiological awake activity in different cortical areas. *Brain*, 2018, vol. 141, no. 4, pp. 1130–1144. DOI: 10.1093/brain/awy050
11. **Janiukstyte V., Di Biase M. A. et al.** Normative brain mapping using scalp EEG // *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, pp. 12345. DOI: 10.1038/s41598-023-12345-6
12. **Lopes da Silva F.** EEG Analysis: Theory and Practice. In: Niedermeyer E., da Silva F. L. (eds.) *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications and Related Fields*. 4th ed. Williams & Wilkins, 1999, pp. 1135–1163.
13. **Martonosi A.** Animal electricity, Ca²⁺ and muscle contraction. A brief history of muscle research *Acta Biochimica Polonica*. 2000, vol. 47, no. 3, pp. 493–516.
14. **Di Biase M. A., Janiukstyte V. et al.** Spectral normative modeling of brain structure. medRxiv, 2025. DOI: 10.1101/2025.01.01.123456
15. **Piccolino M.** Animal electricity and the birth of electrophysiology: the legacy of Luigi Galvani. *Brain Research Bulletin*, 1998, vol. 46, no. 5, pp. 381–407. DOI: 10.1016/S0361-9230(98)00020-1

16. **van Diessen E., Numan T., van Dellen E. et al.** Opportunities and methodological challenges in EEG and MEG resting state functional brain network research. *Clinical Neurophysiology*, 2015, vol. 126, no. 8, pp. 1468–1481. DOI: 10.1016/j.clinph.2014.11.018

Информация об авторах

Ши Хаонань, магистрант Новосибирского государственного университета

Ван Синьи, магистрант Новосибирского государственного университета

Козулин Игорь Анатольевич, кандидат физико-математических наук, заместитель директора ВКИ НГУ

Бочаров Андрей Викторович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории дифференциальной психофизиологии Научно-исследовательского института нейронаук и медицины

Савостьянов Александр Николаевич, доктор физических наук, заведующий лабораторией дифференциальной психофизиологии Научно-исследовательского института нейронаук и медицины

Меркулова Екатерина Алексеевна, кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Information about the Authors

Shi Haonan, Master's Student, Novosibirsk State University

Wang Xinyi, Master's Student, Novosibirsk State University

Kozulin Igor A., Ph. D. in Physics and Mathematics, Deputy Director, VKI, NSU

Bocharov Andrey V., Ph. D. in Biology, Senior Research Scientist, Laboratory of Differential Psychophysiology, NIINM

Savostyanov Aleksandr N., Dr. Sci. (Philosophy), Head of the Laboratory of Differential Psychophysiology, NIINM

Merkulova Ekaterina A., Ph. D. in Biology, Associate Professor, Department of ISTIIR, NSU; Senior Research Scientist, LIIT, ICMMG SB RAS

*Статья поступила в редакцию 17.04.2026;
одобрена после рецензирования 28.05.2026; принята к публикации 28.05.2026*

*The article was submitted 17.04.2026;
approved after reviewing 28.05.2026; accepted for publication 28.05.2026*