



Обзорная статья

УДК 612.017.2:612.821

DOI: 10.37482/2687-1491-Z299

## Применение электроэнцефалографии для оценки адаптационных процессов у человека (обзор)

Михаил Николаевич Панков<sup>1✉</sup>, Андрей Борисович Гудков<sup>2</sup>, Яков Сергеевич Пестов<sup>3</sup>,  
Ольга Николаевна Попова<sup>4</sup>, Ирина Сергеевна Кожевникова<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 4</sup>Северный государственный медицинский университет, Архангельск, Россия

<sup>1, 3, 5</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

<sup>1</sup>[m.pankov@narfu.ru](mailto:m.pankov@narfu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3293-5751>

<sup>2</sup>[gudkovab@nsmu.ru](mailto:gudkovab@nsmu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5923-0941>

<sup>3</sup>[yakovpes@mail.ru](mailto:yakovpes@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0006-4010-157X>

<sup>4</sup>[popova\\_nsmu@mail.ru](mailto:popova_nsmu@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0135-4594>

<sup>5</sup>[kogevnikovais@yandex.ru](mailto:kogevnikovais@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7194-9465>

**Аннотация.** Электроэнцефалография является информативным способом регистрации биоэлектрической активности головного мозга, широко применяемым в физиологических и клинических исследованиях для оценки функционального состояния организма. В целом электроэнцефалография позволяет выявлять характерные адаптационные изменения и помогает понимать общие закономерности компенсаторно-приспособительных реакций. В представленной публикации рассматриваются вопросы использования электроэнцефалографии для оценки адаптационных процессов при стрессе, когнитивных и физических нагрузках. В настоящее время нейрофизиологическая диагностика стрессовых состояний базируется на анализе основных ритмов электроэнцефалограммы: дельта- (1–4 Гц), тета- (4–8 Гц), альфа- (8–14 Гц), бета- (14–30 Гц) и гамма- (>30 Гц) – с оценкой их спектральных характеристик (амплитуда, доминирующая частота, индекс). Современные исследования позволили идентифицировать три ключевых электрофизиологических коррелята стресса: снижение медиофронтальной тета-активности, модификацию дельта-осцилляций и фронтальную альфа-асимметрию. Адаптация к когнитивным нагрузкам представляет собой важнейший механизм поддержания умственной работоспособности и профилактики когнитивного утомления, при этом электроэнцефалография позволяет объективно оценивать функциональное состояние когнитивных процессов, отслеживать динамику изменений основных мозговых ритмов и выявлять ключевые нейрофизиологические механизмы адаптации центральной нервной системы к различным видам умственных нагрузок, что имеет существенное значение как для фундаментальных исследований когнитивных функций, так и для прикладных аспектов оптимизации умственной деятельности. Установлено, что нейрофизиологические механизмы адаптации к физическим нагрузкам включают в себя различные комплексные изменения, которые хорошо отражаются на электроэнцефалограмме. Таким образом, электроэнцефалогра-

фия является эффективным инструментом для оценки не только изменений биоэлектрической активности мозга, но и процессов адаптации и восстановления при стрессе, когнитивных и физических нагрузках.

**Ключевые слова:** электроэнцефалография, стресс, когнитивные нагрузки, физические нагрузки, регистрация адаптивных реакций, спектральные характеристики ритмов электроэнцефалограммы

**Для цитирования:** Панков М.Н., Гудков А.Б., Пестов Я.С., Попова О.Н., Кожевникова И.С. Применение электроэнцефалографии для оценки адаптационных процессов у человека (обзор) // Журнал медико-биологических исследований. 2026. Т. 14, № 3. С. 104–118. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z299>

Review article

## Application of Electroencephalography for Assessing Adaptation Processes in Humans (Review)

Mikhail N. Pankov<sup>1✉</sup>, Andrey B. Gudkov<sup>2</sup>, Yakov S. Pestov<sup>3</sup>, Olga N. Popova<sup>4</sup>,  
Irina S. Kozhevnikova<sup>5</sup>

<sup>1,2,4</sup>Northern State Medical University, Arkhangelsk, Russia

<sup>1,3,5</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

<sup>1</sup>[m.pankov@narfu.ru](mailto:m.pankov@narfu.ru) ✉, <https://orcid.org/0000-0003-3293-5751>

<sup>2</sup>[gudkovab@nsmu.ru](mailto:gudkovab@nsmu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5923-0941>

<sup>3</sup>[yakovpes@mail.ru](mailto:yakovpes@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0006-4010-157X>

<sup>4</sup>[popova\\_nsmu@mail.ru](mailto:popova_nsmu@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0135-4594>

<sup>5</sup>[kogevnikovais@yandex.ru](mailto:kogevnikovais@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7194-9465>

**Abstract.** Electroencephalography is an informative method for recording the electrical activity of the brain, which is widely used in physiological and clinical studies to assess the functional state of the body. In general, electroencephalography allows to identify characteristic adaptive changes and helps understand the general patterns of compensatory and adaptive responses. This review examines the use of electroencephalography to assess adaptation processes during stress, and cognitive and physical exertion. Currently, neurophysiological diagnostics of stressful conditions is based on the analysis of the main electroencephalogram rhythms: delta (1–4 Hz), theta (4–8 Hz), alpha (8–14 Hz), beta (14–30 Hz), and gamma (>30 Hz), with an assessment of their spectral characteristics (amplitude, dominant frequency, index). Modern research has identified three key electrophysiological correlates of stress: decreased mediofrontal theta activity, modified delta oscillations, and frontal alpha asymmetry. Adaptation to cognitive loads is a crucial mechanism for maintaining mental performance and preventing cognitive fatigue. Electroencephalography allows for an objective assessment of the functional state of cognitive processes, tracking the dynamics of changes in fundamental brain rhythms, and identifying key neurophysiological mechanisms of central nervous system adaptation to various types of mental exercise. This is of significant importance for both fundamental research on cognitive functions and applied aspects of optimizing mental performance. The review shows that the neurophysiological mechanisms of adaptation to physical loads include various complex changes that are clearly reflected in the electroencephalogram. Thus, electroencephalography is an effective tool for assessing not only changes in the brain's bioelectrical activity, but also the processes of adaptation and recovery during stress, and cognitive and physical exertion.

**Keywords:** *electroencephalography, stress, cognitive loads, physical loads, recording adaptive responses, spectral characteristics of EEG rhythms*

**For citation:** Pankov M.N., Gudkov A.B., Pestov Ya.S., Popova O.N., Kozhevnikova I.S. Application of Electroencephalography for Assessing Adaptation Processes in Humans (Review). *Journal of Medical and Biological Research*, 2026, vol. 14, no. 3, pp. 104–118. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z299>

В физиологических и клинических исследованиях для оценки функционального состояния организма человека широко применяется электроэнцефалография (ЭЭГ) – простой, но информативный способ регистрации электрической активности мозга.

Многочисленные научные работы подтверждают, что с помощью ЭЭГ можно анализировать компенсаторно-приспособительные реакции на изменение различных внешних факторов. Так, работы Г. Бергера (1929), впервые зафиксировавшего электрическую активность мозга методом ЭЭГ, стали основой для исследования реакций центральной нервной системы (ЦНС) на внешние воздействия [1]. В 1940-е годы с помощью ЭЭГ-методики была изучена адаптация головного мозга к гипоксии, что имело особое значение для авиационной медицины.

В 1950–1960-е годы ЭЭГ стала ключевым методом исследования адаптации человека к экстремальным условиям. Так, советские и американские ученые активно использовали метод ЭЭГ для анализа адаптации космонавтов к условиям невесомости в рамках программ «Восток» и «Меркурий».

Теория активации Д. Линдсли, базирующаяся на ЭЭГ-исследованиях реакций мозга, легла в основу современных представлений о психофизиологической адаптации (ПФА) [2]. В отечественной науке эти идеи получили развитие в работах В.А. Бодрова, который подчеркивал их значимость для оценки влияния экстремальных нагрузок на функциональное состояние и пределы адаптационных возможностей военнослужащих [3].

ЭЭГ стала широко использоваться в клинической практике начиная с 1960-х годов, в т. ч.

для анализа процессов адаптации у пациентов с неврологическими нарушениями [2]. Плюсы данного метода были очевидны: безопасность, неинвазивность и относительная точность в сочетании с вариабельностью применения. Метод позволял выявлять характерные адаптационные реакции, паттерны и в целом понимать общие закономерности адаптационных процессов.

Целью настоящей работы стало обобщение новых сведений об использовании ЭЭГ для оценки адаптационных процессов при стрессе, когнитивных и физических нагрузках.

Поиск публикаций происходил в электронных базах данных PubMed, Google Scholar, eLIBRARY.RU и Web of Science. Использовались следующие ключевые слова и их комбинации: «электроэнцефалография», «ЭЭГ», «адаптация», «стресс», «когнитивные нагрузки», «физические нагрузки», «спектральные характеристики ритмов». Приоритет отдавался оригинальным исследованиям и систематическим обзорам, опубликованным в рецензируемых журналах за последние 10 лет. Всего в обзор включено 50 источников.

**Стресс.** Изучение хронического стресса и его влияния на различные аспекты жизни человека является важнейшим направлением исследований. Хронический стресс может выступать как патогенетический фактор развития самых разных аффективных расстройств: от посттравматического расстройства и тревожных состояний до депрессии. В стрессовом ответе важнейшую роль играет миндалевидное тело, активирующее гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковую систему. Данная система генерирует вегетативную и эмоциональную реакцию на стресс [4]. Вместе

с тем префронтальная кора (ПФК), в частности ее вентромедиальные и дорсолатеральные области, осуществляет когнитивный контроль во время стрессовой реакции через прямые и опосредованные нейронные пути [5].

Дисфункцию префронтально-лимбических взаимодействий ряд авторов рассматривает как ключевой патофизиологический механизм развития аффективных расстройств, включая тревожные состояния и депрессию. В свою очередь, островковая кора, получая интероцептивную информацию от внутренних органов, участвует в формировании осознанного восприятия стрессового состояния в целом, трансформируя физиологические сигналы в субъективный эмоциональный опыт [5, 6].

Нейрофизиологическая диагностика стрессовых состояний базируется на анализе спектральных характеристик (амплитуда, доминирующая частота, индекс) основных ЭЭГ-ритмов: дельта- (1–4 Гц), тета- (4–8 Гц), альфа- (8–14 Гц), бета- (14–30 Гц) и гамма- (>30 Гц). Современные исследования определяют следующие основные электрофизиологические индикаторы стресса: снижение медифронтальной тета-активности; модификацию дельта-осцилляций; фронтальную альфа-асимметрию [7, 8].

Снижение медифронтальной тета-активности отражает дисфункцию префронтального когнитивного контроля, а модификация дельта-осцилляций ассоциируется с нарушением регуляции дофаминергической системы подкрепления. Фронтальная альфа-асимметрия делится на правостороннюю и левостороннюю. Правосторонняя связана с негативным аффектом и пассивным копингом, а левосторонняя – с позитивной эмоциональностью и активным проблемно-ориентированным поведением [7]. Также большое значение для осуществления высших когнитивных функций и принятия решений имеют медифронтальные отделы коры головного мозга, проявляющие активность в тета-диапазоне. Электрофизиологические данные показывают, что увеличение мощности тета-ритма в этих структурах может рассматриваться как нейробиологический маркер

активации компенсаторных механизмов при стрессе, характеризующий мобилизацию когнитивно-контрольных систем ПФК [8].

В нейрофизиологической диагностике важное место занимает анализ вызванных потенциалов (ВП), отражающих корковую реакцию на предъявляемые стимулы. При исследовании стресс-реактивности особое внимание уделяют компонентам P300, N100 и N200. P300, являясь маркером когнитивных процессов внимания и информационной обработки, демонстрирует снижение амплитуды у лиц с выраженным стрессовым состоянием [9]. Ранние компоненты N100 и N200, связанные с первичной сенсорной обработкой, также показывают уменьшение амплитудных характеристик под влиянием стресса [10].

Кроме того, для понимания механизмов дезадаптации в социальной среде принципиальное значение имеет анализ ВП в ситуациях когнитивного конфликта. Так, амплитуда компонента P300 в задачах, связанных с ситуациями обмана, подтверждает свою роль чувствительного индикатора когнитивных процессов, ассоциированных со стрессом и социальной дезадаптацией [11].

Современные работы по изучению стресс-индуцированных трансформаций функционального состояния головного мозга, в т. ч. с использованием ЭЭГ, позволили установить комплекс динамических изменений в системе организации нейрональной активности [12, 13]:

- реорганизацию межкорковых взаимодействий, которая проявляется в изменении показателей когерентности ЭЭГ-сигналов и характеризуется усилением синхронизации между лимбической системой (миндалевидное тело, гиппокамп) и сенсомоторными областями при одновременном ослаблении фронто-лимбической интеграции и нарушении (сдвиге) межполушарного баланса;

- динамику стрессового ответа во времени, проявляющуюся в острой фазе (секунды, минуты) нарастанием бета- и гамма-активности, в подострой фазе (минуты, часы) – изменени-

ями тета- и альфа-ритмов, а при хроническом стрессе – устойчивыми сдвигами спектральной мощности основных ритмов электроэнцефалограммы;

– нарушения паттернов нейрональной синхронизации, выражающиеся в снижении когерентности лобно-височных областей, изменении межполушарной синхронизации и дезинтеграции нормальных циклов «связь-развязка» нейронных сетей.

Современный подход к анализу адаптации организма к стрессу ориентирован на разработку объективных биомаркеров стресса. Успешно зарекомендовало себя одновременное применение различных технологий, таких как ЭЭГ, функциональная магнитно-резонансная томография и машинное обучение. Подобная мультимодальность позволяет уменьшить влияние недостатков каждого из методов и в целом рассматривать мозг как сложную мультимасштабную динамическую систему. Все это способствует установлению объективных биомаркеров стресса и дальнейшему использованию их для персонализированного лечения и профилактики.

Кроме того, существуют данные, которые указывают на фундаментальную связь между стабильностью нейродинамических процессов и эффективностью ПФА. Была обнаружена корреляция между снижением уровня ПФА и ростом аномальных показателей на электроэнцефалограмме. У людей с центральными нарушениями регуляции сердечно-сосудистой системы снижение уровня ПФА было еще более выраженным [13].

Все вышеперечисленные особенности и закономерности, выявленные на ЭЭГ, могут закладываться в основу не только диагностики, но и терапевтического мониторинга (оценка эффективности когнитивно-поведенческой терапии, методы биологической обратной связи, релаксационные техники). Для данного мониторинга большое значение может иметь оценка динамики альфа- и тета-ритмов. Такая динамика может служить объективным показателем успешной адаптации к стрессовым

факторам. В частности, было обнаружено, что у лиц с высокой тревожностью наблюдается снижение индекса концентрации (бета-/альфа-индекс), а также что левосторонняя височная альфа-асимметрия в состоянии покоя способна предсказывать уровень стрессовой реактивности [14].

**Когнитивные нагрузки.** ПФК, особенно ее дорсолатеральная область, играет центральную роль в когнитивном контроле и адаптивном поведении; также ПФК ответственна за рабочую память, планирование и переключение между задачами [15]. Задняя теменная кора и верхняя височная извилина входят в систему внимания и отвечают за переключение его фокуса, обнаружение новых стимулов и интеграцию сенсорной информации [16]. При этом активность корковых и подкорковых структур головного мозга регулируется дофаминергической и норадренергической системами: дофамин усиливает сигналы, которые поступают в ПФК, что повышает когнитивную гибкость головного мозга; норадреналин обостряет бдительность и способность к переориентации внимания [17].

Способность адаптироваться к когнитивным нагрузкам особенно важна для поддержания достаточной умственной работоспособности и профилактики когнитивного утомления. ЭЭГ позволяет в динамике оценивать мозговые ритмы и выявлять паттерны адаптации к разным видам умственных нагрузок, что дает возможность использовать ее не только в фундаментальных научных исследованиях, но и для решения практических задач, например для оптимизации умственной деятельности. Анализ нейрофизиологических показателей когнитивных нагрузок подтверждает, что методы ЭЭГ перспективны для разработки учебных программ и здоровьесберегающих технологий [18].

Для понимания нейрофизиологических основ адаптации большое значение имеют характеристики основных ритмов электроэнцефалограммы. Принято считать, что альфа-ритм связан с процессами расслабления, а также с фазой подготовки к интеллектуальным нагрузкам.

Бета-ритм, напротив, ассоциируется с состоянием высокой концентрации, вовлеченности в интеллектуальные, когнитивные процессы. Интенсивную умственную работу с вовлечением памяти сопровождает активность тета-ритма. В периоды глубокого сна и восстановления проявляется дельта-ритм, также он может сигнализировать о предельном когнитивном истощении.

Адаптацию к когнитивным нагрузкам подразделяют на краткосрочную и долгосрочную. Краткосрочная адаптация проявляется непостоянными и нестабильными изменениями биоэлектрической активности мозга, возникающими в ответ на определенную задачу. Например, при решении сложных интеллектуальных задач наблюдается повышение мощности бета-ритма, что связано с активацией фронтальных областей мозга [19]. Долгосрочная адаптация характеризуется стабилизацией мозговой активности, улучшением нейропластичности, а также устойчивой трансформацией альфа- и бета-ритмов. На процесс долгосрочной адаптации влияют регулярность, интенсивность и продолжительность когнитивных нагрузок [20].

Длительная интеллектуальная нагрузка приводит к подавлению альфа-ритма и возрастанию мощности бета- и тета-ритмов, что указывает на мобилизацию мозговых ресурсов [21]. Кроме того, были зарегистрированы такие нейрофизиологические маркеры внимания, как повышенная мощность тета- (4–6 Гц) и бета-составляющих (18–24 Гц) локального полевого потенциала (англ. local field potential, LFP), усиленная альфа-когерентность (7–11 Гц) LFP, усиленная когерентность спайкового поля (область в зубчатой извилине гиппокампа, расположенная на определенной глубине) в тета- (4–6 Гц), альфа- (7–11 Гц) и гамма-диапазонах (35–50 Гц) [21].

В работе С. Gaillard et al. продемонстрировано, что в процессе длительной когнитивной нагрузки умственная производительность субъекта подвержена ультрамедленным ритмическим флуктуациям (с частотой около 5 циклов в час). Согласно данному исследованию, эти колебания коррелируют с изменениями мощности LFP в тета- и бета-диапазонах,

а также с показателями альфа-когерентности и когерентности импульсного поля (англ. spike-field coherence). Подобные корреляции свидетельствуют о наличии модулирующих влияний со стороны удаленных областей мозга [22].

Эффективность обработки информации, определяющая степень продуктивности умственной деятельности, зависит от пластичности лобно-теменной и дорсальной сетей внимания [23]. Именно гибкая адаптация и активность этих сетей определяют то, насколько успешным будет выполнение когнитивных задач. Однако, например, умеренное лишение сна может приводить к истощению данных сетей. Одним из признаков такого истощения служит увеличение мощности дельта-ритма на электроэнцефалограмме в спокойном состоянии с закрытыми глазами [24]. Были выявлены несколько паттернов умственного утомления: повышение активности низкочастотных (дельта-, тета-, альфа-) и сопутствующее снижение мощности высокочастотных (бета-, гамма-) ритмов [21]. Подобные изменения являются основными паттернами интеллектуальной активности. В то же время ряд исследований показывает совершенно иную картину. Так, в отдельных работах зафиксировано повышение спектральной мощности в бета-диапазоне. Что касается альфа-частот, здесь наблюдались разнонаправленные изменения: в одних случаях мощность альфа-ритма возрастала, в других снижалась [21].

Несмотря на такие противоречивые на первый взгляд данные, роль альфа-ритма в процессах адаптации к умственной нагрузке все же подчеркивается исследованием S. Jia et al.: выявлено, что увеличение альфа-активности после негативной обратной связи предсказывает улучшение производительности, а связано это с процессами тормозного контроля и обучения на ошибках [25]. Согласно обзору R. Ghibellini, B. Meier, активность альфа-ритма может снижаться в процессе нарастания утомления, вместе с тем отмечено, что на определенных этапах перехода от бодрствования ко сну наблюдается

усиление тета-ритмов и ослабление альфа-ритмов [26]. Также была выявлена связь между спектральной мощностью ритмов и уровнем сложности решаемой задачи. При выполнении более простых заданий установлено возрастание альфа- и тета-мощности, тогда как при решении более трудных и ресурсоемких задач рост регистрировался исключительно в тета-диапазоне. Кроме того, была обнаружена зависимость от типа задачи: при выполнении задач на внимание фиксировалось усиление альфа-ритма, а при решении вычислительных задач – повышение тета-активности [27]. Возможно, это объясняется тем, что в задачах на внимание мозг «отключает» зоны, ответственные за обработку помех, чтобы сохранить фокус, а решение вычислительных задач сопровождается вовлечением рабочей памяти и высокой когнитивной нагрузкой.

Были также зафиксированы изменения мощности альфа-ритма в восстановительной фазе после нагрузок. Так, после длительных интеллектуальных задач наблюдалось увеличение альфа-активности, что связано с уменьшением когнитивной нагрузки и возвратом мозга к состоянию покоя, когда происходит восполнение энергетических ресурсов и снижение уровня стресса [28]. Повышенная возбудимость нейронов в таламо-кортикальных системах обуславливает появление низкоамплитудной десинхронизированной электроэнцефалограммы [29].

Если фоновая электроэнцефалограмма демонстрирует общий уровень нейрофизиологических изменений, то для оценки реакции на конкретный стимул применяется показатель вызванной десинхронизации/синхронизации (англ. event-related desynchronization, ERD / event-related synchronization, ERS), отражающий процентное снижение или увеличение спектральной мощности электроэнцефалограммы в определенных частотной полосе и временном интервале при предъявлении стимула. ERD интерпретируется как электрофизиологический индикатор активированных корковых зон, участвующих в переработке конкретной сенсорной или когнитивной информации либо в

формировании того или иного двигательного поведения. Более выраженная или обширная ERD может свидетельствовать о вовлечении в процессы информационной обработки более крупной нейронной сети либо большего числа клеточных кластеров. В свою очередь, ERS интерпретируется как маркер снижения корковой активности, отражающий процессы торможения, нахождения зон мозга в состоянии покоя или их функционального выключения во время текущей деятельности [30].

В ряде работ показана значимость ВП как индикаторов когнитивной нагрузки. Компонент P300 при высокой когнитивной нагрузке демонстрирует снижение амплитуды и увеличение латентности, что отражает дефицит ресурсов, необходимых для решения когнитивных задач. Компонент N200 при многозадачности, когда возникает когнитивный конфликт, характеризуется возрастанием амплитуды, преимущественно в передней поясной коре. Поздний позитивный компонент P600 (англ. late positive component, LPC) прямо коррелирует с глубиной семантической обработки, и его амплитуда снижается при информационной перегрузке. Все это позволяет использовать указанные компоненты для диагностики когнитивных нарушений [30].

Возможности ЭЭГ расширяются с привлечением методов машинного обучения, что открывает перспективы для создания систем нейрореабилитации [31]. Предложен метод обнаружения отвращения внимания на основе ЭЭГ во время двигательной реабилитации с использованием носимых устройств, обладающий точностью до 92,8 %, что позволяет своевременно корректировать внимание пациента. Система мониторинга вовлеченности на основе ЭЭГ достигла точности 77 % в обнаружении когнитивной и эмоциональной вовлеченности студентов, что открывает возможности персонализации образовательного процесса [32].

В целом ЭЭГ можно применять как для мониторинга состояния активности головного мозга в процессе решения когнитивных задач, так и для изучения процесса адаптации. Это может быть

полезно в тех сферах, где требуется высокая умственная работоспособность и продолжительная концентрация. Регистрация электроэнцефалограммы позволяет фиксировать ранние признаки когнитивного утомления, снижения работоспособности, своевременно скорректировать график и условия труда, избежав падения продуктивности и иных нежелательных последствий.

Вместе с ЭЭГ возможно применение тестов, в т. ч. определенных приложений, для дополнения результата. Ценность любых физиологических данных многократно возрастает, если они собраны в условиях, максимально приближенных к реальности. Традиционные тесты часто характеризуются недостаточной экологической валидностью. Современные технологии, такие как виртуальная реальность и сложные 3D-симуляторы, предлагают принципиально новый путь. Они позволяют моделировать целостные смысловые профессиональные сценарии, вовлекая оператора в многоканальное взаимодействие со средой. Исследования показывают, что подобные иммерсивные среды обладают высокой дискриминационной способностью, т. е. могут более тонко и точно дифференцировать когнитивные способности и их изменения по сравнению со стандартными методиками [33].

При изучении адаптации к когнитивным нагрузкам необходимо учитывать и индивидуальные но-типологические различия испытуемых:

1) различия когнитивного резерва, который зависит от уровня образования, интеллектуальной активности, что определяет эффективность нейронной адаптации и выраженность потенциалов, связанных с событиями (event-related potential, ERP), например P300 и N400 при нагрузке; при этом роль нейронной синхронности и изменчивости мозговой динамики в компенсаторных механизмах подчеркивается в контексте когнитивного резерва, устойчивости и поддержания функций при старении [34];

2) возрастные изменения, которые характеризуются снижением специфичности активации и усилением билатерального вовлечения лобных долей как компенсаторного механизма [35–37];

3) гендерные различия, которые включают полоспецифичные паттерны активации (преимущественная вовлеченность нижней лобной извилины у женщин при вербальных нагрузках) и вариабельность нейротрансмиттерных реакций [38, 39].

**Физические нагрузки.** Изучение адаптации к интенсивным физическим нагрузкам является важнейшим направлением исследований в физиологии. Центральное звено адаптации – головной мозг, который регулирует работу всех систем организма. Поскольку характер биоэлектрической активности мозга в покое (при отсутствии патологических изменений) обусловлен генетическими факторами, выявление типичных сдвигов, паттернов на ЭЭГ, возникающих в ответ на серьезную физическую нагрузку, может оказаться информативным и полезным, например, при отборе спортсменов [40].

Адаптация к физическим нагрузкам подразумевает различные комплексные изменения физиологической активности головного мозга. ПФК является важнейшим компонентом процесса адаптации и играет ключевую роль в регуляции утомления, мотивации, модулирует субъективное восприятие физической нагрузки через нисходящий контроль над лимбической системой и базальными ганглиями.

Нейрофизиологические механизмы адаптации к физическим нагрузкам включают, в частности, феномен временной гипофронтальности: при интенсивной физической нагрузке происходит перераспределение метаболических ресурсов мозга, что ведет к снижению активности ПФК. Такое временное ослабление нисходящего контроля над лимбической системой и базальными ганглиями модулирует субъективное восприятие нагрузки и играет ключевую роль в изменении психологического состояния и регуляции утомления [41].

При физическом утомлении наблюдается снижение активации дорсолатеральной ПФК и увеличение тета-активности (4–7 Гц), что коррелирует с уменьшением когнитивного контроля; лимбическая система (особенно передняя

поясная кора и миндалина) опосредует эмоциональную реакцию на нагрузку. Происходит увеличение бета-активности, что связано с восприятием стресса и болевыми ощущениями [42].

У спортсменов в целом регистрируется более высокая мощность биоэлектрической активности мозга. Выявляется усиление альфа-ритма в передних отделах и левой височной области, а также ослабление альфа-активности в правой лобной доле, увеличение мощности дельта-диапазона во всех зонах мозга, за исключением правых переднелобной и височной областей. Также зафиксированы изменения мощности тета-ритма, что может свидетельствовать о более совершенном контроле движений в пространстве [43].

Адаптация к физической работе сопровождается перестройкой функций нейромедиаторов, в частности увеличением выработки норадреналина, дофамина и серотонина. В спорте высоких достижений метод ЭЭГ используется для отслеживания процессов восстановления после физической активности. С этой целью анализируют и оценивают мощность и частоту различных мозговых ритмов, но прежде всего – альфа-ритма [20].

Имеется ряд исследований, посвященных изменениям ритмов под влиянием физических нагрузок [20, 44]. Обычно при высокоинтенсивных нагрузках наблюдается снижение альфа-активности, что связывают с ростом концентрации внимания и падением уровня расслабленности [20]. Однако интенсивность и длительность физической активности могут по-разному влиять на динамику альфа-ритма [45]. Так, для аэробной нагрузки типично повышение альфа-активности, которое объясняют улучшением внимания и уменьшением когнитивной усталости [44]. Усиление бета-ритма связывают с возрастанием сопутствующей когнитивной нагрузки [20, 44].

После физической нагрузки, в восстановительный период, а также при снижении умственной нагрузки отмечается увеличение альфа-активности, особенно в состоянии расслабления с закрытыми глазами [22].

В отличие от альфа-ритма, мощность тета-ритма во время интенсивной физической нагрузки возрастает, особенно в тех зонах мозга, которые отвечают за обработку информации, что способствует улучшению когнитивной гибкости и способности фокусировки на задаче вследствие повышения нейропластичности [44].

Ряд исследований выявил, что различные виды физической нагрузки приводят к определенным, отличным от других, изменениям активности мозговых ритмов. Например, при силовых упражнениях наблюдается увеличение амплитуды бета- и гамма-волн, что связано с активацией моторной коры. При силовых упражнениях необходим высокий контроль движения и силы, поэтому выявляется более значимая синхронизация гамма-ритма в моторной коре и мозжечке [45]. Физическая нагрузка в целом, тип сокращения мышц, объем и вид упражнений значимо влияют на активность мозга, но для получения объективных данных относительно определенных типов физической активности требуются дальнейшие исследования [44].

По сравнению с тяжелоатлетами, у марафонцев отмечаются более значительные изменения альфа-ритма. Также у марафонцев регистрируются повышенная мощность альфа-ритма (8–13 Гц) в теменно-затылочных областях и усиление тета-активности (4–7 Гц) в лобных отделах, что связано с экономией энергии. У атлетов, занимающихся командными игровыми видами спорта (футбол, баскетбол), наблюдается высокая когерентность бета- и гамма-ритмов между лобными и теменными отделами, обеспечивающая быстрое переключение внимания. У спортсменов-стрелков доминирует альфа-ритм в затылочных областях и снижается бета-активность при выстреле, что способствует точности движений [46, 47]. У представителей индивидуальных видов спорта отмечается повышенная мощность тета-ритма в височных и теменных областях, тогда как у командных атлетов, напротив, регистрируется сниженная тета-активность во фронтальных и затылочных отделах, что отражает спортивно-специфическую нейропластичность [48].

Все вышеперечисленные характерные изменения в активности биоэлектрических ритмов мозга можно рассматривать как проявления тенденции организма к энергосбережению. При занятии разными видами спорта и различных активностях организм приспосабливается и создает свою систему экономии и повышения производительности с минимизацией усилий. Теория минимизации усилий при физической активности учитывает автоматические и контролируемые процессы, ситуационные факторы. Она объясняет, почему для преодоления естественной инерции и повышения физической активности требуется целенаправленная стратегия [49].

Таким образом, ЭЭГ является достаточно эффективным и доступным методом оценки

адаптационно-восстановительных процессов при стрессе, когнитивных и физических нагрузках. При использовании данного метода следует учитывать некоторые его особенности: высокая индивидуальная вариабельность ЭЭГ-паттернов, связанная с различиями врожденной активности головного мозга, возрастными и индивидуальными характеристиками, необходимость оценки электроэнцефалограммы с поправкой на клиническую картину и мультидисциплинарного подхода [50]. В целом это может повысить эффективность диагностики. Данный метод дает возможность оценивать не только изменения биоэлектрической активности головного мозга, но и сам процесс адаптации, а также ход восстановления после нагрузок.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

## Список литературы

1. Quigley C. Forgotten Rhythms? Revisiting the First Evidence for Rhythms in Cognition // Eur. J. Neurosci. 2022. Vol. 55, № 11–12. P. 3266–3276. <https://doi.org/10.1111/ejn.15450>
2. Lindsley D.B., Field J., Magoun H.W., Hall V.E. Attention, Consciousness, Sleep and Wakefulness // Handbook of Physiology. Neurophysiology III. Washington, 1960. P. 1553–1593.
3. Бодров В.А. Психологические механизмы адаптации человека // Психология субъекта профессиональной деятельности: сб. науч. тр. М., 2002. С. 13–31.
4. LeDoux J. The Emotional Brain, Fear, and the Amygdala // Cell. Mol. Neurobiol. 2003. Vol. 23, № 4–5. P. 727–738. <https://doi.org/10.1023/a:1025048802629>
5. Arnsten A.F.T. Stress Weakens Prefrontal Networks: Molecular Insights to Higher Cognition // Nat. Neurosci. 2015. Vol. 18, № 10. P. 1376–1385. <https://doi.org/10.1038/nrn.4087>
6. Craig A.D. How Do You Feel – Now? The Anterior Insula and Human Awareness // Nat. Rev. Neurosci. 2009. Vol. 10, № 1. P. 59–70. <https://doi.org/10.1038/nrn2555>
7. Трубаров Ф.С., Зверева З.Ф., Лукьянова С.Н. ЭЭГ-показатели состояния центральной нервной системы у лиц с различными уровнями психофизиологической адаптации // Саратов. науч.-мед. журн. 2019. Т. 15, № 4. С. 965–967.
8. Knyazev G.G. Motivation, Emotion, and Their Inhibitory Control Mirrored in Brain Oscillations // Neurosci. Biobehav. Rev. 2007. Vol. 31, № 3. P. 377–395. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.10.004>
9. Beppi C., Violante I.R., Scott G., Sandrone S. EEG, MEG and Neuromodulatory Approaches to Explore Cognition: Current Status and Future Directions // Brain Cogn. 2021. Vol. 148. Art. № 105677. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2020.105677>
10. Pfurtscheller G., Lopes da Silva F.H. Event-Related EEG/MEG Synchronization and Desynchronization: Basic Principles // Clin. Neurophysiol. 1999. Vol. 110, № 11. P. 1842–1857. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(99\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(99)00141-8)
11. Leue A., Beauducel A. A Meta-Analysis of the P3 Amplitude in Tasks Requiring Deception in Legal and Social Contexts // Brain Cogn. 2019. Vol. 135, № 7. Art. № 103564. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2019.05.002>

12. Hermans E.J., Henckens M.J.A.G., Joëls M., Fernández G. Dynamic Adaptation of Large-Scale Brain Networks in Response to Acute Stressors // *Trends Neurosci.* 2014. Vol. 37, № 6. P. 304–314. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2014.03.006>
13. Firaux T., Tuszyński J.A., Cavaglià M. EMI Model: A Scale Free Biophysical Framework for Human Consciousness, Cognition and Behaviour // *BioSystems.* 2026. Vol. 259. Art. № 105674. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2025.105674>
14. Леонтьева А.Д., Зубарев А.С. Тревожность и нейрофизиологические маркеры: анализ с использованием мобильной ЭЭГ // *Нац. психол. журн.* 2025. Т. 20, № 1. С. 75–85. <https://doi.org/10.11621/npj.2025.0107>
15. Friedman N.P., Robbins T.W. The Role of Prefrontal Cortex in Cognitive Control and Executive Function // *Neuropsychopharmacology.* 2022. Vol. 47, № 1. P. 72–89. <https://doi.org/10.1038/s41386-021-01132-0>
16. Fiebelkorn I.C., Kastner S. Functional Specialization in the Attention Network // *Annu. Rev. Psychol.* 2020. Vol. 71. P. 221–249. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-103429>
17. Robbins T.W., Arnsten A.F. The Neuropsychopharmacology of Fronto-Executive Function: Monoaminergic Modulation // *Ann. Rev. Neurosci.* 2009. Vol. 32. P. 267–287. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.051508.135535>
18. Попова М.А., Чеберяк М.И. Методологические аспекты исследования нейрофизиологических характеристик когнитивных нагрузок студентов в процессе обучения (обзор литературы) // *Соврем. вопр. биомедицины.* 2024. Т. 8, № 4(30). С. 96–105. [https://doi.org/10.24412/2588-0500-2024\\_08\\_04\\_10](https://doi.org/10.24412/2588-0500-2024_08_04_10)
19. McMorris T., Graydon J. The Effect of Exercise on Cognitive Performance in Soccer-Specific Tests // *J. Sports Sci.* 1997. Vol. 15, № 5. P. 459–468. <https://doi.org/10.1080/026404197367092>
20. Komarova Y., Zakharov A., Sergeeva M., Romanchuk N., Vladimirova T., Shirolapov I. Modeling Working Memory in Neurodegeneration: A Focus on EEG Methods // *Diagnostics (Basel).* 2025. Vol. 15, № 23. Art. № 2992. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15232992>
21. Tran Y., Craig A., Craig R., Chai R., Nguyen H. The Influence of Mental Fatigue on Brain Activity: Evidence from a Systematic Review with Meta-Analyses // *Psychophysiology.* 2020. Vol. 57, № 5. Art. № e13554. <https://doi.org/10.1111/psyp.13554>
22. Gaillard C., De Sousa C., Amengual J., Loriette C., Ziane C., Ben Hadj Hassen S., Di Bello F., Ben Hamed S. Attentional Brain Rhythms During Prolonged Cognitive Activity // *BioRxiv.* 2021. <https://doi.org/10.1101/2021.05.26.445730>
23. Weigard A., Angstadt M., Taxali A., Heathcote A., Heitzeg M.M., Sripathi C. Flexible Adaptation of Task-Positive Brain Networks Predicts Efficiency of Evidence Accumulation // *Commun. Biol.* 2024. Vol. 7, № 1. Art. № 801. <https://doi.org/10.1038/s42003-024-06506-w>
24. Adeniji K.O., Igado O.O., Olopade F.E., Femi-Akinlosotu O.M. Sleep Deprivation and Memory: A Neurobiological Perspective // *IBRO Neurosci. Rep.* 2026. Vol. 20. P. 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.ibneur.2026.01.010>
25. Jia S., Liu D., Yue Y., Colzato L., Hommel B., Beste C. Periodic and Aperiodic Neural Activity Contribute to the Microgenesis of Learning from Mistakes // *NeuroImage.* 2025. Vol. 317. Art. № 121341. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2025.121341>
26. Ghibellini R., Meier B. The Hypnagogic State: A Brief Update // *J. Sleep Res.* 2023. Vol. 32, № 1. Art. № e13719. <https://doi.org/10.1111/jsr.13719>
27. Wascher E., Rasch B., Sängler J., Hoffmann S., Schneider D., Rinkenauer G., Heuer H., Guterlet I. Frontal Theta Activity Reflects Distinct Aspects of Mental Fatigue // *Biol. Psychol.* 2014. Vol. 96. P. 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.11.010>
28. Жожикашвили Н.А., Бакумова А.Д., Бочковская И.А. Альфа- и тета-ритмы как маркеры когнитивного усилия // *Рос. психол. журн.* 2022. Т. 19, № 2. С. 201–219. <https://doi.org/10.21702/rpj.2022.2.15>
29. Polich J. Updating P300: An Integrative Theory of P3a and P3b // *Clin. Neurophysiol.* 2007. Vol. 118, № 10. P. 2128–2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
30. Kutas M., Federmeier K.D. Thirty Years and Counting: Finding Meaning in the N400 Component of the Event-Related Brain Potential // *Ann. Rev. Psychol.* 2011. Vol. 62. P. 621–647. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.131123>
31. Apicella A., Arpaia P., Frosolone M., Moccaldi N. High-Wearable EEG-Based Distraction Detection in Motor Rehabilitation // *Sci. Rep.* 2021. Vol. 11, № 1. Art. № 5297. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84447-8>
32. Bhargava Y., Kottapalli A., Baths V. Validation and Comparison of Virtual Reality and 3D Mobile Games for Cognitive Assessment Against ACE-III in 82 Young Participants // *Sci. Rep.* 2024. Vol. 14, № 1. Art. № 23918. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75065-1>

33. Jauny G., Eustache F., Hinault T.T. M/EEG Dynamics Underlying Reserve, Resilience, and Maintenance in Aging: A Review // *Front. Psychol.* 2022. Vol. 13. Art. № 861973. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.861973>
34. Stern Y. Cognitive Reserve // *Neuropsychologia*. 2009. Vol. 47, № 10. P. 2015–2028. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.03.004>
35. Park D.C., Reuter-Lorenz P. The Adaptive Brain: Aging and Neurocognitive Scaffolding // *Ann. Rev. Psychol.* 2009. Vol. 60. P. 173–196. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093656>
36. Steffener J., Habeck C.G., Stern Y. Age-Related Changes in Task Related Functional Network Connectivity // *PLoS One*. 2012. Vol. 7, № 9. Art. № e44421. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044421>
37. Wiegand I., Lauritzen M.J., Osler M., Mortensen E.L., Rostrup E., Rask L., Richard N., Horwitz A., Benedek K., Vangkilde S., Petersen A. EEG Correlates of Visual Short-Term Memory in Older Age Vary with Adult Lifespan Cognitive Development // *Neurobiol. Aging*. 2018. Vol. 62. P. 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2017.10.018>
38. Munro C.A., McCaul M.E., Wong D.F., Oswald L.M., Zhou Y., Brasic J., Kuwabara H., Kumar A., Alexander M., Ye W. et al. Sex Differences in Striatal Dopamine Release in Healthy Adults // *Biol. Psychiatry*. 2006. Vol. 59, № 10. P. 966–974. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.01.008>
39. Цыган В.Н., Богословский М.М., Миролюбов А.В. Электроэнцефалография / под ред. М.М. Дьяконова. СПб., 2008. 187 с.
40. Dietrich A. Transient Hypofrontality as a Mechanism for the Psychological Effects of Exercise // *Psychiatry Res.* 2006. Vol. 145, № 1. P. 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2005.07.033>
41. Ekkekakis P. Illuminating the Black Box: Investigating Prefrontal Cortical Hemodynamics During Exercise with Near-Infrared Spectroscopy // *J. Sport Exerc. Psychol.* 2009. Vol. 31, № 4. P. 505–553. <https://doi.org/10.1123/jsep.31.4.505>
42. Черепкина Л.П., Тристан В.Г. Особенности биоэлектрической активности головного мозга спортсменов // *Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер.: Образование, здравоохранение, физ. культура*. 2011. № 39(256). С. 27–31.
43. Балиоз Н.В., Архипова Е.Е., Мозолева Н.В., Кривошеков С.Г. Электроэнцефалографические маркеры функционального состояния центральной нервной системы в спортивной практике // *Ульянов. мед.-биол. журн.* 2023. № 3. С. 30–48. <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2023-3-30-48>
44. Cheron G., Petit G., Cheron J., Leroy A., Cebolla A., Cevallos C., Petieau M., Hoellinger T., Zarka D., Clarinval A.-M., Dan B. Brain Oscillations in Sport: Toward EEG Biomarkers of Performance // *Front. Psychol.* 2016. Vol. 7. Art. № 246. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00246>
45. Visser A., Piskin D., Büchel D., Baumeister J. Electro cortical Activity During Resistance Exercises in Healthy Young Adults – a Systematic Review // *Front. Sports Act. Living*. 2024. Vol. 6. Art. № 1466776. P. 1–17. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1466776>
46. Dirik H.B. Neurophysiological Impact of Physical Activity: EEG Differences Between Sedentary, Individual Athletes, and Team Athletes // *Gazi J. Phys. Educ. Sports Sci.* 2025. Vol. 30, № 4. P. 169–179. <https://doi.org/10.53434/gbesbd.1793781>
47. Li L., Smith D.M. Neural Efficiency in Athletes: A Systematic Review // *Front. Behav. Neurosci.* 2021. Vol. 15. Art. № 698555. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2021.698555>
48. Cheval B., Boisgontier M.P. The Theory of Effort Minimization in Physical Activity // *Exerc. Sport Sci. Rev.* 2021. Vol. 49, № 3. P. 168–178. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000252>
49. Zhai Z., Han L., Zhang W. Using EEG Technology to Enhance Performance Measurement in Physical Education // *Front. Public Health*. 2025. Vol. 13. Art. № 1551374. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1551374>
50. Jackson A.F., Bolger D.J. The Neurophysiological Bases of EEG and EEG Measurement: A Review for the Rest of Us // *Psychophysiology*. 2014. Vol. 51, № 11. P. 1061–1071. <https://doi.org/10.1111/psyp.12283>

## References

1. Quigley C. Forgotten Rhythms? Revisiting the First Evidence for Rhythms in Cognition. *Eur. J. Neurosci.*, 2022, vol. 55, no. 11–12, pp. 3266–3276. <https://doi.org/10.1111/ejn.15450>
2. Lindsley D.B., Field J., Magoun H.W., Hall V.E. Attention, Consciousness, Sleep and Wakefulness. *Handbook of Physiology. Neurophysiology III*. Washington, 1960, pp. 1553–1593.
3. Bodrov V.A. Psikhologicheskiye mekhanizmy adaptatsii cheloveka [Psychological Mechanisms of Human Adaptation]. *Psikhologiya adaptatsii i sotsial'naya sreda: sovremennye podkhody, problemy, perspektivy*. [The Psychology of Adaptation and the Social Environment: Modern Approaches, Problems, and Prospects]. Moscow, 2007, pp. 42–61.

4. LeDoux J. The Emotional Brain, Fear, and the Amygdala. *Cell. Mol. Neurobiol.*, 2003, vol. 23, no. 4–5, pp. 727–738. <https://doi.org/10.1023/a:1025048802629>
5. Arnsten A.F.T. Stress Weakens Prefrontal Networks: Molecular Insults to Higher Cognition. *Nat. Neurosci.*, 2015, vol. 18, no. 10, pp. 1376–1385. <https://doi.org/10.1038/nn.4087>
6. Craig A.D. How Do You Feel – Now? The Anterior Insula and Human Awareness. *Nat. Rev. Neurosci.*, 2009, vol. 10, no. 1, pp. 59–70. <https://doi.org/10.1038/nrn2555>
7. Torubarov F.S., Zvereva Z.F., Lukyanova S.N. EEG Indicators of the State of the Central Nervous System in Individuals with Different Levels of Psychophysiological Adaptation. *Saratov J. Med. Sci. Res.*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 965–967 (in Russ.).
8. Knyazev G.G. Motivation, Emotion, and Their Inhibitory Control Mirrored in Brain Oscillations. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, 2007, vol. 31, no. 3, pp. 377–395. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.10.004>
9. Bepi C., Violante I.R., Scott G., Sandrone S. EEG, MEG and Neuromodulatory Approaches to Explore Cognition: Current Status and Future Directions. *Brain Cogn.*, 2021, vol. 148. Art. no. 105677. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2020.105677>
10. Pfurtscheller G., Lopes da Silva F.H. Event-Related EEG/MEG Synchronization and Desynchronization: Basic Principles. *Clin. Neurophysiol.*, 1999, vol. 110, no. 11, pp. 1842–1857. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(99\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(99)00141-8)
11. Leue A., Beauducel A. A Meta-Analysis of the P3 Amplitude in Tasks Requiring Deception in Legal and Social Contexts. *Brain Cogn.*, 2019, vol. 135, no. 7. Art. no. 103564. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2019.05.002>
12. Hermans E.J., Henckens M.J.A.G., Joëls M., Fernández G. Dynamic Adaptation of Large-Scale Brain Networks in Response to Acute Stressors. *Trends Neurosci.*, 2014, vol. 37, no. 6, pp. 304–314. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2014.03.006>
13. Firaux T., Tuszyński J.A., Cavaglia M. EMI Model: A Scale Free Biophysical Framework for Human Consciousness, Cognition and Behaviour. *BioSystems*, 2026, vol. 259. Art. no. 105674. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2025.105674>
14. Leonteva A.D., Zubarev A.S. Anxiety and Neurophysiological Markers: Mobile EEG Analysis. *Natl. Psychol. J.*, 2025, vol. 20, no. 1, pp. 75–85 (in Russ.). <https://doi.org/10.11621/npj.2025.0107>
15. Friedman N.P., Robbins T.W. The Role of Prefrontal Cortex in Cognitive Control and Executive Function. *Neuropsychopharmacology*, 2022, vol. 47, no. 1, pp. 72–89. <https://doi.org/10.1038/s41386-021-01132-0>
16. Fiebelkorn I.C., Kastner S. Functional Specialization in the Attention Network. *Annu. Rev. Psychol.*, 2020, vol. 71, pp. 221–249. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-103429>
17. Robbins T.W., Arnsten A.F.T. The Neuropsychopharmacology of Fronto-Executive Function: Monoaminergic Modulation. *Annu. Rev. Neurosci.*, 2009, vol. 32, pp. 267–287. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro.051508.135535>
18. Popova M.A., Chebryak M.I. Metodologicheskie aspekty issledovaniya neyrofiziologicheskikh kharakteristik kognitivnykh nagruzok studentov v protsesse obucheniya (obzor literatury) [Methodological Aspects of Researching the Neurophysiological Characteristics of Cognitive Loads in Students During the Learning Process (Literature Review)]. *Mod. Iss. Biomed.*, 2024, vol. 8, no. 4, pp. 96–105 (in Russ.). [https://doi.org/10.24412/2588-0500-2024\\_08\\_04\\_10](https://doi.org/10.24412/2588-0500-2024_08_04_10)
19. McMorris T., Graydon J. The Effect of Exercise on Cognitive Performance in Soccer-Specific Tests. *J. Sports Sci.*, 1997, vol. 15, no. 5, pp. 459–468. <https://doi.org/10.1080/026404197367092>
20. Komarova Y., Zakharov A., Sergeeva M., Romanchuk N., Vladimirova T., Shirolapov I. Modeling Working Memory in Neurodegeneration: A Focus on EEG Methods. *Diagnostics (Basel)*, 2025, vol. 15, no. 23. Art. no. 2992. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15232992>
21. Tran Y., Craig A., Craig R., Chai R., Nguyen H. The Influence of Mental Fatigue on Brain Activity: Evidence from a Systematic Review with Meta-Analyses. *Psychophysiology*, 2020, vol. 57, no. 5. Art. no. e13554. <https://doi.org/10.1111/psyp.13554>
22. Gaillard C., De Sousa C., Amengual J., Lorette C., Ziane C., Ben Hadj Hassen S., Di Bello F., Ben Hamed S. Attentional Brain Rhythms During Prolonged Cognitive Activity. *BioRxiv*, 2021. <https://doi.org/10.1101/2021.05.26.445730>
23. Weigard A., Angstadt M., Taxali A., Heathcote A., Heitzeg M.M., Sripada C. Flexible Adaptation of Task-Positive Brain Networks Predicts Efficiency of Evidence Accumulation. *Commun. Biol.*, 2024, vol. 7, no. 1. Art. no. 801. <https://doi.org/10.1038/s42003-024-06506-w>
24. Adeniji K.O., Igado O.O., Olopade F.E., Femi-Akinlosotu O.M. Sleep Deprivation and Memory: A Neurobiological Perspective. *IBRO Neurosci. Rep.*, 2026, vol. 20, pp. 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.ibneur.2026.01.010>

25. Jia S., Liu D., Yue Y., Colzato L., Hommel B., Beste C. Periodic and Aperiodic Neural Activity Contribute to the Microgenesis of Learning from Mistakes. *NeuroImage*, 2025, vol. 317. Art. no. 121341. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2025.121341>
26. Ghibellini R., Meier B. The Hypnagogic State: A Brief Update. *J. Sleep Res.*, 2023, vol. 32, no. 1. Art. no. e13719. <https://doi.org/10.1111/jsr.13719>
27. Wascher E., Rasch B., Sanger J., Hoffmann S., Schneider D., Rinkenauer G., Heuer H., Gutberlet I. Frontal Theta Activity Reflects Distinct Aspects of Mental Fatigue. *Biol. Psychol.*, 2014, vol. 96, pp. 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.11.010>
28. Zhzhikashvili N.A., Bakumova A.D., Bochkovskaya I.A. Al'fa- i teta-ritmy kak markery kognitivnogo usiliya [Alpha and Theta Rhythms as Markers of Cognitive Effort]. *Russ. Psychol. J.*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 201–219.
29. Polich J. Updating P300: An Integrative Theory of P3a and P3b. *Clin. Neurophysiol.*, 2007, vol. 118, no. 10, pp. 2128–2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
30. Kutas M., Federmeier K.D. Thirty Years and Counting: Finding Meaning in the N400 Component of the Event-Related Brain Potential. *Annu. Rev. Psychol.*, 2011, vol. 62, pp. 621–647. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.131123>
31. Apicella A., Arpaia P., Frosolone M., Moccaldi N. High-Wearable EEG-Based Distraction Detection in Motor Rehabilitation. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1. Art. no. 5297. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84447-8>
32. Bhargava Y., Kottapalli A., Baths V. Validation and Comparison of Virtual Reality and 3D Mobile Games for Cognitive Assessment against ACE-III in 82 Young Participants. *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, no. 1. Art. no. 23918. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75065-1>
33. Jauny G., Eustache F., Hinault T.T. M/EEG Dynamics Underlying Reserve, Resilience, and Maintenance in Aging: A Review. *Front. Psychol.*, 2022, vol. 13. Art. no. 861973 <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.861973>
34. Stern Y. Cognitive Reserve. *Neuropsychologia*, 2009, vol. 47, no. 10, pp. 2015–2028. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.03.004>
35. Park D.C., Reuter-Lorenz P. The Adaptive Brain: Aging and Neurocognitive Scaffolding. *Annu. Rev. Psychol.*, 2009, vol. 60, pp. 173–196. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093656>
36. Steffener J., Habeck C.G., Stern Y. Age-Related Changes in Task Related Functional Network Connectivity. *PLoS One*, 2012, vol. 7, no. 9. Art. no. e44421. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044421>
37. Wiegand I., Lauritzen M.J., Osler M., Mortensen E.L., Rostrup E., Rask L., Richard N., Horwitz A., Benedek K., Vangkilde S., Petersen A. EEG Correlates of Visual Short-Term Memory in Older Age Vary with Adult Lifespan Cognitive Development. *Neurobiol. Aging*, 2018, vol. 62, pp. 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2017.10.018>
38. Munro C.A., McCaul M.E., Wong D.F., Oswald L.M., Zhou Y., Brasic J., Kuwabara H., Kumar A., Alexander M., Ye W. et al. Sex Differences in Striatal Dopamine Release in Healthy Adults. *Biol. Psychiatry*, 2006, vol. 59, no. 10, pp. 966–974. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2006.01.008>
39. Tsygan V.N., Bogoslovsky M.M., Mirolyubov A.V. *Elektroentsefalografiya* [Electroencephalography]. Saint Petersburg, 2008. 192 p.
40. Dietrich A. Transient Hypofrontality as a Mechanism for the Psychological Effects of Exercise. *Psychiatry Res.*, 2006, vol. 145, no. 1, pp. 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2005.07.033>
41. Ekkekakis P. Illuminating the Black Box: Investigating Prefrontal Cortical Hemodynamics During Exercise with Near-Infrared Spectroscopy. *J. Sport Exerc. Psychol.*, 2009, vol. 31, no. 4, pp. 505–553. <https://doi.org/10.1123/jsep.31.4.505>
42. Cherapkina L.P., Tristan V.G. Osobennosti bioelektricheskoy aktivnosti golovnogo mozga sportmenov [Features of the Bioelectric Activity of Athletes' Brains]. *Bull. South Ural State Univ. Ser. Educ. Healthc. Phys. Cult.*, 2011, no. 39, pp. 27–31.
43. Balioz N.V., Arkhipova E.E., Mozolevskaya N.V., Krivoshchekov S.G. Electroencephalographic Markers of CNS Functional State in Sport. *Ulyanovsk Med. Biol. J.*, 2023, no. 3, pp. 30–48 (in Russ.). <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2023-3-30-48>
44. Cheron G., Petit G., Cheron J., Leroy A., Cebolla A., Cevallos C., Petieau M., Hoellinger T., Zarka D., Clarinval A.-M., Dan B. Brain Oscillations in Sport: Toward EEG Biomarkers of Performance. *Front. Psychol.*, 2016, vol. 7. Art. no. 246. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00246>

45. Visser A., Piskin D., Büchel D., Baumeister J. Electrocortical Activity During Resistance Exercises in Healthy Young Adults – a Systematic Review. *Front. Sports Act. Living*, 2024, vol. 6. Art. no. 1466776. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1466776>
46. Dirik H.B. Neurophysiological Impact of Physical Activity: EEG Differences Between Sedentary, Individual Athletes, and Team Athletes. *Gazi J. Phys. Educ. Sports Sci.*, 2025, vol. 30, no. 4, pp. 169–179. <https://doi.org/10.53434/gbesbd.1793781>
47. Li L., Smith D.M. Neural Efficiency in Athletes: A Systematic Review. *Front. Behav. Neurosci.*, 2021, vol. 15. Art. no. 698555. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2021.698555>
48. Cheval B., Boisgontier M.P. The Theory of Effort Minimization in Physical Activity. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, 2021, vol. 49, no. 3, pp. 168–178. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000252>
49. Zhai Z., Han L., Zhang W. Using EEG Technology to Enhance Performance Measurement in Physical Education. *Front. Public Health*, 2025, vol. 13. Art. no. 1551374. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1551374>
50. Jackson A.F., Bolger D.J. The Neurophysiological Bases of EEG and EEG Measurement: A Review for the Rest of Us. *Psychophysiology*, 2014, vol. 51, no. 11, pp. 1061–1071. <https://doi.org/10.1111/psyp.12283>

Поступила в редакцию 26.03.2026 / Одобрена после рецензирования 14.05.2026 / Принята к публикации 18.05.2026.  
Submitted 26 March 2026 / Approved after reviewing 14 May 2026 / Accepted for publication 18 May 2026.