

УДК 612.821

DOI 10.34014/2227-1848-2023-3-30-48

## ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ В СПОРТИВНОЙ ПРАКТИКЕ

Н.В. Балиоз<sup>1</sup>, Е.Е. Архипова<sup>2</sup>, Н.В. Мозолева<sup>2</sup>, С.Г. Кривошеков<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины»,

г. Новосибирск, Россия;

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный университет экономики и управления»,

г. Новосибирск, Россия

*Во всем мире существует повышенный интерес спортивных специалистов к привлечению новых технологий в тренировочный процесс для совершенствования спортивного мастерства. По литературным данным, важное место при оценке функционального состояния спортсменов занимают ЭЭГ-маркеры динамики когнитивных функций, сенсомоторной интеграции и психологической устойчивости. Показано, что у представителей спортивной элиты, помимо высокого уровня физической подготовки, развиваются специфические для определенного вида спорта когнитивные навыки, а также высокая сенсомоторная интеграция, улучшение внимания, восприятия, скорости обработки информации и другие характеристики, нацеленные на обеспечение высокой работоспособности спортсмена. В обзоре представлен систематический анализ публикаций, посвященных изучению взаимосвязи физической активности и функционального состояния ЦНС. Установлено, что при исследовании влияния физических нагрузок с высокой и низкой интенсивностью в качестве нейробиологических маркеров состояния когнитивных функций хорошо зарекомендовали себя показатели мощности и частоты альфа-ритма ЭЭГ.*

*При анализе использовались базы данных Medline, Web of Science, Scopus, Pubmed, Cochrane, Embase, Google Scholar, eLIBRARY.*

**Ключевые слова:** физическая активность, когнитивные функции, спортивные результаты, электроэнцефалография, альфа-ритм.

**Введение.** Многочисленные литературные источники свидетельствуют, что физические упражнения вызывают функциональные изменения центральной нервной системы (ЦНС), оказывают влияние на когнитивные функции, физическое и психическое здоровье [1–3]. Нейробиологические исследования показывают, что адаптация к физическим нагрузкам сопровождается образованием новых нейронных связей за счет пластичности мозга, что обеспечивает рост функциональных резервов спортсменов [4]. На сегодняшний день очевидно, что элитные спортсмены, помимо развития моторных навыков, демонстрируют высокую сенсомоторную интеграцию, сопряженность работы кардиореспираторной системы, высокие мотивационные и волевые качества, определяющие эталон спортивной формы [5–8]. Сведения о работе мозга в различных спортивных ситуациях,

а также его изменениях в течение индивидуальной жизни [9, 10] позволили раскрыть вклад когнитивных функций в повышение спортивных результатов [11–13]. Использование новых методических подходов на базе электроэнцефалографии [14], функциональной магнитно-резонансной томографии [15, 16], позитронно-эмиссионной томографии [17], однофотонной эмиссионной томографии [18] значительно расширило понимание динамики когнитивных процессов в контексте физической активности и спорта. Одним из наиболее популярных и доступных методов оценки кортикальной активности мозга остается электроэнцефалография (ЭЭГ).

**Цель обзора.** Обобщение результатов исследований взаимосвязи функционального состояния ЦНС и электрокортикальной активности головного мозга при интенсивных физических нагрузках.

**Физическая активность и функциональное состояние ЦНС.** Показано, что высокая эффективность работы нейронных сетей у элитных спортсменов обусловлена выполнением и закреплением составных моторных навыков в результате ежедневных физических тренировок [19, 20]. Связь между физической нагрузкой и адаптивными изменениями в структурах мозга подтверждается обнаруженными изменениями синаптической пластичности в нейронных сетях после физической нагрузки и индукцией нейрогенеза в гиппокампе сигнальными молекулами (нейротрофический фактор головного мозга, инсулиноподобный фактор роста-1) [21–23]. Примером влияния физических упражнений на мозг является анксиолитическое состояние, которое описывается бегунами на длинные дистанции [24]. Изучение биохимических механизмов, лежащих в основе этого явления, указывает на увеличение содержания эндоканнабиноидов в плазме, которые связываются с каннабиноидными рецепторами в головном мозге [25, 26].

Также в литературе накоплено достаточно много фактов, демонстрирующих взаимосвязи между когнитивными показателями и результатами спортсменов игровых видов спорта на соревнованиях [27–29]. Авторы полагают, что полученные результаты могут быть актуальны для отбора спортсменов в тех видах спорта, которые требуют постоянного внимания, управления множеством переменных или адаптации к меняющимся ситуациям. В частности, отмечено, что креативность, проявляемая игроками в футбол и баскетбол, обусловлена усилением внимания [28, 29]. Qiu et al. отметили, что элитные спортсмены, как правило, демонстрируют лучшие показатели в скорости когнитивной обработки при выполнении заданий на внимание [30], а Yarrow et al. показали, что пластичность мозга является предиктором успешного поведения игрока на игровом поле [4]. Развитие этой концепции позволило установить, что для выполнения быстрых перемещений в таких видах спорта, как футбол, баскетбол, хоккей и др., требуется гибкая адаптация поведения, которая включает такие сложные когнитивные функции, как восприятие, дискриминация стимула, при-

нятие решений, усиление выборочного внимания [31–33]. Установлено, что быстрая перенастройка от общего до выборочного внимания требуется для быстрой коррекции поведения в пространстве, основу которой составляет многомодальная интеграция, влияющая на эффективность работы нейронной сети [34–36]. Кроме того, показано, что адаптация к физическим упражнениям сопровождается улучшением функции эпизодической памяти [37].

В свете вышесказанного возникает задача выбора методов контроля работы мозга при адаптации к спортивным нагрузкам. Одним из доступных и надежных методов, позволяющих адекватно оценивать функциональное состояние ЦНС, является ЭЭГ, которая обеспечивает измерение нейронной активности в режиме реального времени [38]. Несмотря на сложности записи ЭЭГ-активности во время физических тренировок из-за значительного влияния артефактов движения в решении этой проблемы отмечены определенные успехи за счет модификации метода, чем объясняется популярность его использования [39].

**Оценка альфа-ритма как специфического ЭЭГ-маркера при занятиях разными видами спорта.** Активность мозга отражается пятью биомаркерами ЭЭГ, определяемыми их частотными диапазонами: дельта-диапазон (<4 Гц), тета-диапазон (4–8 Гц), альфа-диапазон (8–13 Гц), бета-диапазон (13–30 Гц) и гамма-диапазон (30–70 Гц). Эти полосы ЭЭГ характеризуют отдельные нейронные ансамбли, связанные с различными типами функционального состояния (физическая активность, сон, расслабление и др.). Многочисленные исследования показали, что анализ частотных диапазонов ЭЭГ хорошо подходит для отслеживания сенсорных, когнитивных и моторных процессов, присущих спортивному поведению, а также для изучения нейронных механизмов, важных для спортивных результатов [40, 41]. В частности, результаты, касающиеся особенностей ЭЭГ у спортсменов, показали важную роль изменений спектральной мощности во всех частотных диапазонах [42, 43]. Кроме того, контроль частотных диапазонов ЭЭГ используется для коррекции физиологических функций и поведения с помощью БОС-

тренировок в спортивной практике, которые облегчают управление определенными паттернами коркового возбуждения, обеспечивая улучшение поведенческих функций [44–46].

Наиболее привлекательным для исследователей оказался альфа-ритм, который является доминирующей частотой в ЭЭГ у взрослых. На электроэнцефалограмме альфа-ритм четко прослеживается как набор веретенообразных колебаний в текущих мозговых волнах, и его легко отличить от других ритмов [47]. Известно, что амплитуда колебаний альфа-диапазона достигает своего пика в состоянии покоя с закрытыми глазами, в первую очередь из-за выключения сенсорного воздействия. Подавление амплитуды колебаний альфа-диапазона происходит в ответ на открывание глаз (реакция десинхронизации). Анализ альфа-активности включает отслеживание изменений амплитуды, частоты или фазы альфа-колебаний в пределах индивидуально определенного альфа-диапазона [48]. Множество исследований подтверждают мнение, что альфа-ритм играет активную роль в когнитивной обработке [49–51]. В частности, предполагается, что альфа-колебания отражают механизм функционального торможения, регулирующий включение и выключение сенсорных областей в зависимости от требований задачи [52, 53]. Отдельные поддиапазоны альфа-ритма (низкочастотный и высокочастотный) отражают когнитивные функции, такие как производительность памяти [54], процессы глобального возбуждения и внимания [55, 56], развитие сенсомоторных навыков или семантической информации [57, 58], поддержание рабочей памяти [59, 60], волевое торможение двигательных программ [61] и моторное обучение [62, 63].

С учетом вышесказанного становится понятным особый интерес исследователей к изучению динамики ЭЭГ у спортсменов *ациклических* видов спорта, для которых такие качества, как быстрота, скорость и точность реагирования на поведение соперника, являются залогом успеха. Показано, что у этих спортсменов характер представленности альфа-ритма является маркером причастности к определенному виду спортивной деятельности и зависит

от уровня профессионального мастерства [64]. Установлено, у спортсменов ациклических видов спорта во время интенсивных двигательных актов наблюдается снижение мощности альфа- и бета-ритмов в левом полушарии на фоне увеличения мощности тета-ритма в лобных областях коры обоих полушарий. Успешность реализации моторного действия сопровождается усилением мощности сенсомоторного ритма преимущественно в лобных, центральных и теменных областях коры. Сила мышечного сокращения у спортсменов ациклических видов спорта коррелирует с усилением мощности высокочастотных составляющих ЭЭГ практически по всей поверхности коры. Состояние утомления у спортсменов ациклических видов спорта характеризуется преимущественным снижением активности лобных зон коры. Исследования ЭЭГ профессиональных спортсменов, занимающихся карате, показали, что изменения альфа-сигнала в определенных отведениях связаны с когнитивно-моторными показателями, в частности альфа-сигнал отражает изменения, связанные с тренировкой и приобретением опыта. Так, у элитных спортсменов-каратистов по сравнению со спортсменами-любителями и неспортсменами отмечены высокие значения низкочастотных (8–10,5 Гц) альфа-ритмов в теменной и затылочной областях [65]. Кроме того, у спортсменов-каратистов по сравнению с лицами, не занимающимися спортом, наблюдается ослабление десинхронизации низкочастотного альфа-ритма в правой затылочной, лобных и центральных зонах коры и снижение десинхронизации высокочастотного альфа-ритма в лобных и центральных областях коры. По мнению авторов, факт низкой реактивности коры у этих спортсменов можно объяснить высоким уровнем переработки информации в состоянии покоя [65].

Тренировки, нацеленные на изменение характеристик альфа-ритма (мощности, частоты), применяются в методах с использованием биологической обратной связи (БОС) для улучшения когнитивных функций и формирования оптимального функционального состояния нервной системы [66, 67], что важно при подготовке спортсменов высокого

класса. Во время применения БОС-тренинга частотный анализ ЭЭГ используется для получения графической или иллюстративной информации о мощности определенных диапазонов ЭЭГ, которую непрерывно получает испытуемый спортсмен. Опираясь на эту информацию, человек учится сознательно изменять физиологическую функцию в нужном направлении [68]. БОС-тренинги получили широкое распространение в различных видах спорта высших достижений [69]. В частности, показано удачное использование БОС-тренинга для достижения высоких результатов в таких видах спорта, как стрельба из пневматической винтовки и лука [70, 71]. Авторы полагают, что использование ЭЭГ в качестве сигнала для БОС приводит к наиболее благоприятному взаимодействию различных структур головного мозга, необходимому для достижения высоких результатов. В частности, это достигается подавлением «шума» от ненужной в данный момент активности других структур мозга и сдвигом частоты доминирующего ритма в более высокочастотную зону [56, 72]. Несмотря на то что на данный момент использование БОС-тренинга как метода повышения спортивных результатов не получило широкого распространения, наблюдается прогресс в оценке нейронных коррелятов вовлеченности в спортивную деятельность определенной направленности.

Контроль за характеристиками альфа-ритма ЭЭГ позволил получить сведения о вариабельности этого показателя у представителей разных видов спорта. У лиц, занимающихся спортивными танцами, отмечаются более высокие показатели амплитуды альфа-ритма по сравнению с контролем и теннисистами. Выявленные отличия, по мнению авторов, зависят от уровня пластичности ЦНС [73]. Также показано, что у профессиональных спортсменов, занимающихся спортивной гимнастикой и карате, выраженность альфа-ритма в теменных и затылочных областях коры ниже, чем у лиц, не занимающихся спортом и спортсменов-любителей. В этих же группах спортсменов отмечена низкая реактивность альфа-ритма при открывании глаз (реакция десинхронизации) в центральных и

лобных областях коры. Установленные различия, по мнению авторов, обусловлены спецификой вида спорта и уровнем профессиональной спортивной подготовки [69].

Отдельные авторы используют контроль за характеристиками альфа-ритма ЭЭГ для диагностики функционального состояния. В частности, отмечено, что повышение мощности ритмов альфа-1 и альфа-2 в теменных зонах коры головного мозга связано с физическим утомлением и отражает снижение уровня активации в сенсомоторной коре [74]. В то же время есть точка зрения, что смещение активности альфа-ритма от затылочных областей к центральной и теменной областям коры у единоборцев может служить не только показателем состояния утомления, но и маркером сотрясения головного мозга и рассматриваться как критерий допуска к тренировочной деятельности [75].

Сравнение ЭЭГ спортсменов *циклических и ациклических видов* спорта показало значимые отличия в показателях спектральной мощности основных ритмов в 16 отведениях [76]. У спортсменов с аэробной направленностью физических нагрузок (циклические виды: бег на лыжах, легкоатлетический бег, плавание, езда на велосипеде, гребля, бег на коньках и т.д.) выявлена более отчетливая взаимосвязь активной работы кардиореспираторной системы с активизацией когнитивных процессов и внимания, чего не наблюдалось у спортсменов ациклических видов [77]. Сравнение спектральной мощности ЭЭГ (отведение Pz, три частотных диапазона: тета, альфа, бета) у представителей разных циклических видов показало, что как в покое, так и в гипоксическом тесте десинхронизация альфа-ритма, глубина которой свидетельствует об уровне активации мозга, у пловцов выше, чем у лыжников [78]. По мнению авторов, этот процесс обеспечивается активацией ретикулярной и лимбической систем, а более выраженная реакция десинхронизации ЭЭГ у пловцов свидетельствует о повышенной чувствительности и хемореактивности ретикулярной и лимбической систем у них по сравнению с лыжниками. Вместе с тем следует признать, что обнаруженные различия между лыжниками и плов-

цами могут быть не только следствием специфики физической нагрузки, но и разными фенотипическими адаптивными приспособлениями к особенностям паттерна дыхания, положению тела и разной степени выраженности гипоксической нагрузке в тренировочном процессе у спортсменов этих видов спорта.

Таким образом, в литературе собраны доказательства информативности энцефалографических маркеров для оценки функционального состояния, когнитивных функций и уровня профессионального спортивного мастерства. Вместе с тем создается впечатление, что в ряде случаев этих маркеров недостаточно для получения надежной информации о состоянии функций у отдельного спортсмена. Обращает на себя внимание тот факт, что оценка динамики ритмов ЭЭГ в основном использовалась для диагностики функционального состояния ЦНС и когнитивных функций у спортсменов ациклических видов спорта, что вполне объяснимо, учитывая важную роль сенсомоторной интеграции в таких видах спорта. В связи с этим в следующих разделах настоящего обзора обсуждаются литературные сведения о методических подходах к ЭЭГ-диагностике, нацеленных на индивидуальные характеристики функциональных состояний.

**Взаимосвязь индивидуальной частоты альфа-активности (IAPF) с эффективностью внимания в спорте.** IAPF (Individual alpha peak frequency) – это дискретная частота с наибольшим значением мощности в диапазоне альфа-колебаний (7,5–12,5 Гц) [55]. Индивидуальную частоту альфа-активности, являющуюся важным интегральным показателем альфа-ритма, считают маркером состояния возбуждения и внимания человека [79], а межиндивидуальные различия в частоте альфа-пиков связывают с эффективностью рабочей памяти [55]. Большое исследование, проведенное Grandy et al., показало, что IAPF хотя и является достаточно стабильным нейрофизиологическим показателем, но меняется с возрастом: увеличивается от детского до зрелого возраста, а затем снижается при достижении пожилого возраста [80]. Показано, что межиндивидуальная изменчивость альфа-частоты в значительной степени объясняется

генетическими факторами [81], в частности исследования близнецов показывают оценки наследуемости около 80 % [82]. Установлено, что индивидуальные значения IAPF положительно связаны со скоростью обработки информации [83] и выполнением когнитивных задач [55]. Так, люди с более высоким IAPF по сравнению с обладателями низких значений демонстрируют более короткое время реакции, лучшие показатели рабочей памяти [80] и производительности памяти [84].

Факт того, что IAPF является стабильным индивидуальным маркером нейрофизиологических признаков, позволил использовать данный показатель для индивидуальных прогнозов в различных видах спорта. На сегодняшний день представлен ряд исследований, в которых изучалась взаимосвязь между физической активностью и IAPF. Использование этого маркера позволило проводить наблюдения и делать индивидуальные прогнозы, касающиеся влияния физических упражнений на ЦНС у пожилых людей – улучшение внимания, памяти и исполнительных функций [85–87]. С использованием IAPF было показано, что регулярные физические упражнения от умеренной до высокой интенсивности защищают от возрастных нарушений когнитивных функций и обеспечивают адекватное функционирование человека в дальнейшей жизни [88]. В частности, установлено, что физическая активность улучшает когнитивные функции у пациентов с болезнью Альцгеймера [89, 90].

В исследовании с участием групп молодых и зрелых людей показано, что IAPF коррелирует с такими переменными когнитивной эффективности, как скорость реакции на конфликт [91] и предвосхищение [92]. Отмечено существование связи между IAPF и индивидуальной памятью, в связи с чем считается, что IAPF может быть показателем способности к запоминанию и обучению [79]. Так, исследование, проведенное Bornkessel et al., показало, что индивидуумы с низкими значениями IAPF (8,5–9,7 Гц) испытывают более высокую нагрузку при обработке текстовой информации, чем люди с более высокими значениями IAPF (10–11,6 Гц) [93]. Аналогичным образом исследование Rathee et al. продемонстриро-

вало, что IAPF может служить маркером межличностных различий в лингвистических тестах [94]. Существуют наблюдения, говорящие о том, что существенные сдвиги индивидуальных значений показателя IAPF обнаруживаются только при больших физических усилиях, связанных с сердечно-сосудистыми и метаболическими процессами [95]. Исследование, проведенное Hülsdünker et al., показало положительный сдвиг в IAPF при выполнении задачи поддержания балансировки, отражая «увеличение инвестиций в кортикальные ресурсы» [96]. Кроме того, есть единичные работы, указывающие на непосредственное влияние физических упражнений на IAPF. В частности, обнаружено, что IAPF увеличивается после выполнения упражнений высокой интенсивности [97] и сохраняется около 30 мин после прекращения изнурительных упражнений [98], тогда как физические упражнения умеренной интенсивности не влияют на IAPF.

Поскольку IAPF увеличивается во время выполнения когнитивных и сенсомоторных задач, а также в ответ на интенсивные физические упражнения, высказано предположение, что этот факт может отражать активацию различных групп нейронов [99, 100]. Однако неясно, почему значения IAPF устойчивы к изменениям в одних парадигмах и неустойчивы в других.

Взаимосвязь между IAPF и эффективностью внимания в спортивных играх вызывает отдельный интерес. Для успеха спортсмена в таких играх, как футбол, баскетбол или хоккей, необходима быстрая обработка зрительно-тактической информации: наблюдение за мячом (шайбой), траекториями движения других участников игры, контроль собственного перемещения на поле. На основе этого анализа в коре мозга выбирается оптимальное двигательное действие, которое способствует наступательному или оборонительному преимуществу. Это многокомпонентный процесс, включающий разделенное внимание, принятие решений и двигательное поведение [101, 102]. Так, в работе Zhang et al. для оценки эффективности внимания использовалась задача отслеживания множества объектов (ОМО) у

элитных игроков-хоккеистов и игроков среднего уровня. Установлено, что элитные игроки имели более высокие значения IAPF и демонстрировали более точные показатели ОМО, чем игроки среднего уровня. В связи с этим авторы полагают, что базовые значения IAPF могут быть полезны для прогнозирования индивидуальных ресурсов эффективности внимания у спортсменов игровых видов [101]. В литературе есть только одно исследование с участием игроков в настольный теннис и бадминтон, результаты которого показали, что визуальное восприятие и скорость зрительно-моторной реакции не зависят от индивидуальной альфа-частоты [103].

Таким образом, изучение взаимосвязи физической нагрузки различной интенсивности и динамики IAPF позволяет рассматривать данный показатель как нейрофизиологический маркер состояния возбуждения и внимания индивида, а также как маркер скорости обработки перцептивной и когнитивной информации.

**Заключение.** Анализ литературных источников показывает рост числа публикаций, в которых обнаруживаются доказательства благоприятного влияния умеренных физических упражнений на когнитивные функции и взаимосвязь нейрофизиологических механизмов с эффективностью мышечной деятельности. Спортсмены представляют удобную модель для исследования корреляций между функцией ЦНС и интенсивностью / продолжительностью спортивной деятельности. Множество когнитивных навыков, таких как внимание, сенсомоторная интеграция, психологическая устойчивость и выносливость, влияют на успешность спортивных выступлений и демонстрируют зависимость от конкретного вида спорта. Установлено, что роль когнитивных функций возрастает в ациклических видах спорта, требующих постоянного внимания, управления и обработки множества переменных сигналов, быстрой адаптации поведенческих реакций к меняющимся ситуациям. Многочисленные работы с контролем ЭЭГ-сигналов показывают, что перспективным показателем для объяснения взаимосвязи физических упражнений и работы мозга является

альфа-ритм. Индивидуальная частота и мощность альфа-пика служат информативными нейрофизиологическими маркерами, которые тесно связаны с функциональным состоянием ЦНС и базовыми когнитивными функциями. Специфика этой связи и механизмы ее форми-

рования нуждаются в дальнейшем изучении, поскольку открывают новые подходы к улучшению спортивных результатов. Можно полагать, что оценка индивидуальной частоты альфа-активности перспективна для отбора элитных спортсменов.

*Работа выполнена за счёт федерального бюджета на проведение фундаментальных научных исследований (тема № 122042600140-6).*

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

### **Вклад авторов**

Литературный поиск, обработка материала: Балиоз Н.В., Архипова Е.Е., Мозолевская Н.В.

Анализ и интерпретация данных: Балиоз С.Г., Архипова Е.Е., Мозолевская Н.В.

Написание и редактирование текста: Балиоз С.Г., Кривошеков С.Г.

### **Литература**

1. Fister I., Fister D., Deb S., Mlakar U., Brest J. Post hoc analysis of sport performance with differential evolution. *Neural Comput. Appl.* 2018; 1–10. DOI: 10.1007/s00521-018-3395-3.
2. Henriksen K., Storm L.K., Stambulova N., Pyrdol N., Larsen C.H. Successful and less successful interventions with youth and senior athletes: insights from expert sport psychology practitioners. *J. Clin. Sport Psychol.* 2019; 13 (1): 72–94. DOI: 10.1123/jcsp.2017-0005.
3. Dalen T., Sandmae S., Stevens T.G., Hjelde G.H., Kjosnes T.N., Wisløff U. Differences in acceleration and high-intensity activities between small-sided games and peak periods of official matches in elite soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 2021; 35 (7): 2018–2024. DOI: 10.1519/JSC.0000000000003081.
4. Yarrow K., Brown P., Krakauer J.W. Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports. *Nat. Rev. Neurosci.* 2009; 10 (8): 585–596. DOI: 10.1038/nrn2672.
5. Chang Y., Lee J.J., Seo J.H., Song H.J., Kim Y.T., Lee H.J. Neural correlates of motor imagery for elite archers. *NMR Biomed.* 2011; 24: 366–372. DOI: 10.1002/nbm.1600.
6. Жуина Д.В., Майдокина Л.Г. Психологические особенности спортсменов-победителей. Современные проблемы науки и образования. 2014; 6: 1519–1522. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22878836> (дата обращения: 20.02.2023).
7. Вергунов Е.Г., Николаева Е.И., Балиоз Н.В., Кривошеков С.Г. Латеральные предпочтения как возможные фенотипические предикторы резервов сердечно-сосудистой системы и особенности сенсоромоторной интеграции у альпинистов. *Физиология человека.* 2018; 44 (3): 97–108. DOI: 10.7868/S0131164618030116.
8. Zhang L., Qiu F., Zhu H., Xiang M., Zhou L. Neural Efficiency and Acquired Motor Skills: An fMRI Study of Expert Athletes. *Front Psychol.* 2019; 6 (10): 27–38. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02752. PMID: 31866917. PMCID: PMC6908492.
9. Cabeza R., Albert M., Belleville S., Craik F.I., Duarte A., Grady C.L. Maintenance, reserve and compensation: the cognitive neuroscience of healthy ageing. *Nat. Rev. Neurosci.* 2018; 19: 701–710. DOI: 10.1038/s41583-018-0068-2.
10. Dumoulin S.O., Fracasso A., Van der Zwaag W., Siero J.C., Petridou N. Ultra-high field MRI: advancing systems neuroscience towards mesoscopic human brain function. *Neuroimage.* 2018; 168: 345–357. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.01.028.
11. Fink A., Rominger C., Benedek M., Perchtold C.M., Papousek I., Weiss E.M. EEG alpha activity during imagining creative moves in soccer decision-making situations. *Neuropsychologia.* 2018; 114: 118–124. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.025.
12. Кабачкова А.В., Захарова А.Н., Кривошеков С.Г., Каплевич Л.В. Двигательная активность и когнитивная деятельность: особенности взаимодействия и механизмы влияния. *Физиология человека.* 2022; 48 (5): 126–136. DOI: 10.31857/S0131164622700102.

13. Costanzo M.E., VanMeter J.W., Janelle C.M., Braun A., Miller M.W., Oldham J. Neural efficiency in expert cognitive-motor performers during affective challenge. *J. Mot. Behav.* 2016; 48: 573–588. DOI: 10.1080/00222895.2016.1161591.
14. Cheron G., Petit G., Cheron J., Leroy A., Cebolla A., Cevallos C. Brain oscillations in sport: toward EEG biomarkers of performance. *Front. Psychol.* 2016; 7: 246–271. DOI: 10.3389/fpsyg.2016.00246.
15. Chaddock-Heyman L., Erickson K.I., Voss M.W., Knech A.M., Pontifex M.B., Castelli D.M. The effects of physical activity on functional MRI activation associated with cognitive control in children: a randomized controlled intervention. *Front. Hum. Neurosci.* 2013; 7: 72. DOI: 10.3389/fnhum.201300072.
16. Fontes E.B., Okano A.H., De Guio F., Schabort E.J., Min L.L., Basset F.A. Brain activity and perceived exertion during cycling exercise: an fMRI study. *Br. J. Sport Med.* 2015; 49: 556–560. DOI: 10.1136/bjsports-2012-091924.
17. Boecker H., Drzezga A. A perspective on the future role of brain pet imaging in exercise science. *Neuroimage.* 2016; 131: 73–80. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2015.10.021.
18. Shih C.H., Moore K., Browner N., Sklerov M., Dayan E. Physical activity mediates the association between striatal dopamine transporter availability and cognition in Parkinson's disease. *Parkinsonism Relat. Disord.* 2019; 62: 68–72. DOI: 10.1016/j.parkreldis.2019.01.027.
19. Zhang L., Qiu F., Zhu H., Xiang M., Zhou L. Neural Efficiency and Acquired Motor Skills: An fMRI Study of Expert Athletes. *Front Psychol.* 2019; 6 (10): 27–38. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02752. PMID: 31866917. PMCID: PMC6908492.
20. Huang P., Fang R., Li B.Y., Chen S.D. Exercise-related changes of networks in aging and mild cognitive impairment brain. *Front. Aging Neurosci.* 2016; 8: 47. DOI: 10.3389/fnagi.2016.00047.
21. Pedersen B.K., Saltin B. Exercise as medicine – evidence for prescribing exercise as therapy in 26 different chronic diseases. *Scand J Med Sci Sports.* 2015; 25 (3): 1–72. DOI: 10.1111/sms.12581.
22. Cassilhas R.C., Tufik S., De Mello M.T. Physical exercise, neuroplasticity, spatial learning and memory. *Cell. Mol. Life Sci.* 2016; 73: 975–983. DOI: 10.1007/s00018-015-2102-0.
23. Mellow M.L., Goldsworthy M.R., Coussens S., Smith A.E. Acute aerobic exercise and neuroplasticity of the motor cortex: a systematic review. *J. Sci. Med. Sports.* 2019; 23: 408–414. DOI: 10.1016/j.jsams.2019.10.015.
24. Hicks S.D., Jacob P., Perez O., Baffuto M., Gagnon Z., Middleton F.A. The transcriptional signature of a runner's high. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2019; 51: 970–978. DOI: 10.1249/MSS.0000000000001865.
25. Sparling P.B., Giuffrida A., Piomelli D., Roszkopf L., Dietrich A. Exercise activates the endocannabinoid system. *Neuroreport.* 2003; 14: 2209–2211. DOI: 10.1097/00001756-200312020-00015.
26. Skosnik P.D., Hajos M., Cortes-Briones J.A., Edwards C.R., Pittman B.P., Hoffmann W.E. Cannabinoid receptor-mediated disruption of sensory gating and neural oscillations: a translational study in rats and humans. *Neuropharmacology.* 2018; 135: 412–423. DOI: 10.1016/j.neuropharm.2018.03.036.
27. Verburgh L., Scherder E.J., Van Lange P.A., Oosterlaan J. Executive functioning in highly talented soccer players. *PLoS One.* 2014; 9 (3): e91254. DOI: 10.1371/journal.pone.0091254.
28. Vestberg T., Reinebo G., Maurex L., Ingvar M., Petrovic P. Core executive functions are associated with success in young elite soccer players. *PLoS One.* 2017; 12: e0170845. DOI: 10.1371/journal.pone.0170845.
29. Policastro F., Accardo A., Marcovich R., Pelamatti G., Zoia S. Relation between motor and cognitive skills in Italian basketball players aged between 7 and 10 Years Old. *Sports (Basel).* 2018; 6 (3): 80. DOI: 10.3390/sports6030080.
30. Qiu F., Pi Y., Liu K., Li X., Zhang J., Wu Y. Influence of sports expertise level on attention in multiple object tracking. *Peer J.* 2018; 6: e5732. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.5732>. PMID: 30280051.
31. Kudo K., Ito T., Tsutsui S., Yamamoto Y., Ishikura T. Compensatory coordination of release parameters in a throwing task. *J. Mot. Behav.* 2000; 32 (4): 337–345. DOI: 10.1080/00222890009601384.
32. Kudo K., Ohtsuki T. Adaptive variability in skilled human movements. *Inform. Media Technol.* 2008; 3 (1): 409–420. DOI: 10.1527/tjsai.23.151.
33. Давлетьярова К.В., Нагорнов М.С., Кривошеков С.Г., Ильин А.А., Капилевич Л.В. Физиологические характеристики двигательных навыков ударных действий у футболистов с ограниченными возможностями здоровья. *Физиология человека.* 2022; 48 (2): 5–13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48022777> (дата обращения: 20.02.2023). DOI: 10.31857/S0131164622010040.



34. Fontani G., Maffei D., Cameli S., Polidori F. Reactivity and event-related potentials during attentional tests in athletes. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1999; 80 (4): 308–317. DOI: 10.1007/s004210050597.
35. Kudo K., Miyazaki M., Kimura T., Yamanaka K., Kadota H., Hirashima M., Nakajima Y., Nakazawa K., Ohtsuki T. Selective activation and deactivation of the human brain structures between speeded and precisely timed tapping responses to identical visual stimulus: an fMRI study. *NeuroImage.* 2004; 22 (3): 1291–1301. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2004.03.043.
36. Laurienti P.J., Burdette J.H., Wallace M.T., Yen Y.F., Field A.S., Stein B.E. Deactivation of sensory-specific cortex by cross-modal stimuli. *J. Cogn. Neurosci.* 2002; 14 (3): 420–429. DOI: 10.1162/089892902317361930.
37. Loprinzi P.D., Ponce P., Frith E. Hypothesized mechanisms through which acute exercise influences episodic memory. *Physiology International.* 2018; 105 (4): 285–297. DOI: 10.1556/2060.105.2018.4.28.
38. Rossini P.M., Di Iorio R., Bentivoglio M., Bertini G., Ferreri F., Gerloff C. Methods for analysis of brain connectivity: an IFCN-sponsored review. *Clin. Neurophysiol.* 2019; 130: 1833–1858. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.06.006.
39. Gwin J.T., Gramann K., Makeig S., Ferris D.P. Removal of movement artifact from high-density EEG recorded during walking and running. *J. Neurophysiol.* 2010; 103: 3526–3534. DOI: 10.1152/jn.00105.2010.
40. Crews D.J., Landers D.M. Electroencephalographic measures of attentional patterns prior to the golf putt. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1993; 25 (1): 116–126. DOI: 10.1249/00005768-199301000-00016.
41. Salazar W., Landers D.M., Petruzzello S.J., Han M.W., Crews D.J., Kubitz K.A. Hemispheric asymmetry, cardiac response, and performance in elite archers. *Res. Q. Exerc. Sport.* 1990; 61 (4): 351–359. DOI: 10.1080/02701367.1990.10607499.
42. Nakata H., Yoshie M., Miura A., Kudo K. Characteristics of the athletes' brain: Evidence from neurophysiology and neuroimaging (Review). *Japan Society for the Promotion of Science.* 2010; 62: 197–211. DOI: 10.1016/j.brainresrev.2009.11.006.
43. Wilson V.E., Dikman Z., Bird E.I., Williams J.M., Harmison R., Shaw-Thornton L., Schwartz G.E. EEG Topographic Mapping of Visual and Kinesthetic Imagery in Swimmers (Review). *Appl Psychophysiol Biofeedback.* 2016; 41 (1): 121–127. DOI: 10.1007/s10484-015-9307-8.
44. Lubar J.F., Shouse M.N. EEG and behavioral changes in a hyperkinetic child concurrent with training of the sensorimotor rhythm (SMR): a preliminary report. *Biofeedback Self-Regul.* 1976; 1 (3): 293–306. DOI: 10.1007/BF01001170.
45. Landers D.M., Petruzzello S.J., Salazar W., Crews D.J. The influence of electro-cortical biofeedback on performance in pre-elite archers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1991; 23 (1): 123–129.
46. Gordon E.M., Chauvin R.J., Van A.N. A somato-cognitive action network alternates with effector regions in motor cortex. *Nature.* 2023. DOI: 10.1038/s41586-023-05964-2. PMID: 37076628.
47. Fumoto M., Oshima T., Kamiya K. Ventral prefrontal cortex and serotonergic system activation during pedaling exercise induces negative mood improvement and increased alpha band in EEG. *Behavioural Brain Research.* 2010; 213 (1): 1–9. DOI: 10.1016/j.bbr.2010.04.017.
48. Basar E. A review of alpha activity in integrative brain function: fundamental physiology, sensory coding, cognition and pathology. *Int. J. Psychophysiol.* 2012; 86 (1): 1–24. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2012.07.002.
49. Bazanova O.M., Vernon D. Interpreting EEG alpha activity. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2013; 44: 94–110. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2013.05.007.
50. Cooper N.R., Croft R.J., Dominey S.J., Burgess A.P., Gruzeliier J.H. Paradox lost? Exploring the role of alpha oscillations during externally vs. internally directed attention and the implications for idling and inhibition hypotheses. *Int. J. Psychophysiol.* 2003; 47 (1): 65–74. DOI: 10.1016/s0167-8760(02)00107-1.
51. Klimesch W., Sauseng P., Hanslmayr S. EEG alpha oscillations: the inhibition timing hypothesis. *Brain Res. Rev.* 2007; 53 (1): 63–88. DOI: 10.1016/j.brainresrev.2006.06.003.
52. Foxe J.J., Snyder A.C. The role of alpha-band brain oscillations as a sensory suppression mechanism during selective attention. *Front. Psychol.* 2011; 2: 154. DOI: 10.3389/fpsyg.2011.00154.
53. Mathewson K.E., Lleras A., Beck D.M., Fabiani M., Ro T., Gratton G. Pulsed out of awareness: EEG alpha oscillations represent a pulsed inhibition of ongoing cortical processing. *Front. Psychol.* 2011; 2: 99. DOI: 10.3389/fpsyg.2011.00099.

54. *Jensen O., Bonnefond M., VanRullen R.* An oscillatory mechanism for prioritizing salient unattended stimuli. *Trends Cogn. Sci.* 2012; 16: 200–206.
55. *Klimesch W.* EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res. Rev.* 1999; 29 (2): 169–195.
56. *Thut G., Nietzel A., Brandt S.A., Pascual-Leone A.* Alpha-band electroen-cephalographic activity over occipital cortex indexes visuospatial attention bias and predicts visual target detection. *J. Neurosci.* 2006; 26 (37): 9494–9502. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0875-06.2006.
57. *Напалков Д.А., Ратманова П.О., Салихова Р.Н., Коликов М.Б.* Электроэнцефалографические корреляты оптимального функционального состояния головного мозга спортсмена в стрелковом спорте. *Бюллетень сибирской медицины.* 2013; 12 (2): 219–226.
58. *Klimesch W., Doppelmayr M., Pachinger T., Russegger H.* Event-related desynchronization in the alpha band and the processing of semantic information. *Cogn. Brain Res.* 1997; 6 (2): 83–94. DOI: 10.1016/S0926-6410(97)00018-9.
59. *Klimesch W., Doppelmayr M., Russegger H., Pachinger T., Schwaiger J.* Induced alpha band power changes in the human EEG and attention. *Neurosci. Lett.* 1998; 244 (2): 73–76. DOI: 10.1016/S0304-3940(98)00122-0.
60. *Jensen O., Tesche C.D.* Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *Eur. J. Neurosci.* 2002; 15 (8): 1395–9. DOI: 10.1046/j.1460-9568.2002.01975.x.
61. *Tuladhar A.M., Huurne N., Schoffelen J.M., Maris E., Oostenveld R., Jensen O.* Parieto-occipital sources account for the increase in alpha activity with working memory load. *Hum. Brain Mapp.* 2007; 28 (8): 785–92. DOI: 10.1002/hbm.20306.
62. *Hummel F., Andres F., Altenmuller E., Dichgans J., Gerloff C.* Inhibitory control of acquired motor programmes in the human brain. *Brain.* 2002; 125 (2): 404–420. DOI: 10.1093/brain/awf030.
63. *Jancke L., Lutz K., Koeneke S.* Converging evidence of ERD/ERS and BOLD responses in motor control research. *Prog. Brain Res.* 2006; 159: 261–271. DOI: 10.1016/S0079-6123(06)59018-1.
64. *Loze G.M., Collins D., Holmes P.S.* Pre-shot EEG alpha-power reactivity during expert air-pistol shooting: a comparison of best and worst shots. *J. Sports Sci.* 2001; 19 (9): 727–733. DOI: 10.1080/02640410152475856.
65. *Черный С.В., Мишин Н.П., Нагаева Е.И.* Особенности электроэнцефалограммы спортсменов ациклических видов спорта. 2016; 2 (68): 45–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28130360> (дата обращения: 20.02.2023).
66. *Сороко С.И., Трубочев В.В.* Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления. СПб.: Политехника-сервис; 2010. 188.
67. *Алексеева М.В., Балиоз Н.Б., Муравлёва К.Б., Сапина Е.А., Базанова О.М.* Использование тренинга произвольного увеличения мощности ЭЭГ в индивидуальном высокочастотном альфа-диапазоне для улучшения когнитивной деятельности. *Физиология человека.* 2012; 6 (37): 1–10.
68. *Базанова О.М., Вернон Д., Лазарева О.Ю., Муравлёва К.Б., Скорая М.В.* Влияние альфа-, ЭМГ-биоуправления и техник произвольной саморегуляции на показатели когнитивных функций и альфа-активность ЭЭГ. *Бюллетень сибирской медицины.* 2013; 12 (2): 36–42. DOI: 10.20538/1682-0363-2013-2-36-42.
69. *Park J.L., Fairweather M.M., Donaldson D.I.* Making the case for mobile cognition: EEG and sports performance. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2015; 52: 117–130. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2015.02.014.
70. *Harkness T.* Psykinetics and Biofeedback: Abhinav Bindra wins India's first-ever individual Gold Medal in Beijing Olympics. *Biofeedback.* 2009; 37 (2): 48–52. DOI: 10.5298/1081-5937-37.2.48.
71. *Haufler A.J., Spalding T.W., Santa Maria D.L., Hatfield B.D.* Neuro-cognitive activity during a self-paced visuospatial task: Comparative EEG profiles in marksmen and novice shooters. *Biol. Psychol.* 2000; 53 (2–3): 131–160. DOI: 10.1016/S0301-0511(00)00047-8.
72. *Илларионова А.В., Кривошеков С.Г., Ильин А.А., Капилевич Л.В.* Физиологические особенности формирования двигательной координации на основе тренировок с биологической обратной связью. *Физиология человека.* 2022; 48 (4): 5–21. DOI: 10.31857/S013116462204004X.
73. *Del Percio C., Infranato F., Marzano N., Iacoboni M., Aschieri P., Lizio R., Soricelli A., Limatola C., Rossini P.M., Babiloni C.* Reactivity of alpha rhythms to eyes opening is lower in athletes than non-athletes: a high-resolution EEG study. *Int. J. Psychophysiol.* 2011; 82 (3): 240–247. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2011.09.005.

74. *Ermütlu N., Yücesir I., Eskikurt G., Temel T.* Brain electrical activities of dancers and fast ball sports athletes are different. *Cogn. Neurodyn.* 2015; 9 (2): 257–263. DOI: 10.1007/s11571-014-9320-2.
75. *Baumeister J., von Detten S., van Niekerk S.M., Schubert M., Ageberg E., Louw Q.A.* Brain activity in predictive sensorimotor control for landings: an EEG pilot study. *Int J Sports Med.* 2013; 34 (12): 1106–1111. DOI: 10.1055/s-0033-1341437.
76. *Черапкина Л.П.* Особенности паттерна ЭЭГ у спортсменов, занимающихся циклическими видами спорта. Актуальные проблемы адаптивной физической культуры и спорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции. 17–18 февраля 2016. Омск; 2016: 291–299.
77. *Tsai C.L., Chen F.C., Pan C.Y., Wang C.H., Huang T.H., Chen T.C.* Impact of acute aerobic exercise and cardiorespiratory fitness on visuospatial attention performance and serum BDNF levels. *Psychoneuroendocrinol.* 2014; 41: 121–131. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2013.12.014.
78. *Балиоз Н.В., Кривощев С.Г.* Индивидуально-типологические особенности ЭЭГ спортсменов при остром гипоксическом воздействии. *Физиология человека.* 2012; 38 (5): 24–32.
79. *Jann K., Koenig T., Dierks T., Boesch C., Federspiel A.* Association of individual resting state EEG alpha frequency and cerebral blood flow. *Neuroimage.* 2010; 51: 365–72. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.02.024. PMID: 20156573.
80. *Grandy T.H., Werkle-Bergner M., Chicherio C., Schmiedek F., LoËvderm M., Lindenberger U.* Peak individual alpha frequency qualifies as a stable neurophysiological trait marker in healthy younger and older adults. *Psychophysiology.* 2013; 50: 570–582. DOI: 10.1111/psyp.12043.
81. *Bodenmann S., Rusterholz T., Dürr R., Stoll C., Bachmann V., Geissler E., Jaggi-Schwarz K., Landolt H.-P.* The functional Val158Met polymorphism of COMT predicts interindividual differences in brain  $\alpha$  oscillations in young men. *J. Neurosci.* 2009; 29: 10855–10862. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1427-09.2009.
82. *Smit C.M., Wright M.J., Hansell N.K., Geffen G.M., Martin N.G.* Genetic variation of individual alpha frequency (IAF) and alpha power in a large adolescent twin sample. *Int. J. Psychophysiol.* 2006; 61 (2): 235–243. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2005.10.004.
83. *Klimesch W., Schimke H., Pfurtscheller G.* Alpha frequency, cognitive load and memory performance. *Brain Topography.* 1993; 5: 241–51. DOI: 10.1007/BF01128991. PMID: 8507550.
84. *Christie S., Di Fronso S., Bertollo M., Werthner P.* Individual Alpha Peak Frequency in Ice Hockey Shooting Performance. *Front Psychol.* 2017; 8: 762. DOI: 10.3389/fpsyg.2017.00762. PMID: 28559868.
85. *Bherer L., Erickson K.I., Liu-Ambrose T.* A review of the effects of physical activity and exercise on cognitive and brain functions in older adults. *J. Aging Res.* 2013; 2013: 657508. DOI: 10.1155/2013/657508.
86. *Kramer A.F., Colcombe S.* Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study-revisited. *Perspect. Psychol. Sci.* 2018; 13: 213–217. DOI: 10.1111/1467-9280.t01-1-01430.
87. *Crespillo-Jurado M., Delgado-Giralt J., Reigal R.E., Rosado A., Wallace-Ruiz A., Juárez Ruiz de Mier R.* Body composition and cognitive functioning in a sample of active elders. *Front. Psychol.* 2019; 10: 1569. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.01569.
88. *Zhu W., Wadley V.G., Howard V.J., Hutto B., Blai S.N., Hooker S.P.* Objectively Measured Physical Activity and Cognitive Function in Older Adults. *Med. Sci. Sport Exerc.* 2017; 49: 47–53. DOI: 10.1249/MSS.0000000000001079.
89. *Гультияева В.В., Зинченко М.И., Урюмцев Д.Ю., Кривощев С.Г., Афтанас Л.И.* Физическая нагрузка при лечении депрессии. Физиологические механизмы. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2019; 119 (7): 112–119. DOI: 10.17116/jnevro2019119071112.
90. *Гультияева В.В., Зинченко М.И., Урюмцев Д.Ю., Кривощев С.Г., Афтанас Л.И.* Физическая нагрузка при лечении депрессии. Режимы и виды нагрузки. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2019; 119 (9): 136–142. DOI: 10.17116/jnevro2019119091136.
91. *Jin Y., O'Halloran J.P., Plon L., Sandman C.A., Potkin S.G.* Alpha EEG predicts visual reaction time. *Int. J. Neurosci.* 2006; 116: 1035–1044. DOI: 10.1080/00207450600553232. PMID: 16861166.
92. *Basar E., Yordanova J., Kolev V., Basar-Eroglu C.* Is the alpha rhythm a control parameter for brain responses? *Biological Cybernetics.* 1997; 76: 471–80. DOI: 10.1007/s004220050360. PMID: 9263433.
93. *Bornkessel I.D., Fiebach C.J., Friederici A.D., Schlesewsky M.* "Capacity" reconsidered: interindividual differences in language comprehension and individual alpha frequency. *Exp Psychol.* 2004; 51: 279–289. DOI: 10.1027/1618-3169.51.4.279. PMID: 15620229.

94. Rathee S., Bhatia D., Punia V., Singh R. Peak Alpha Frequency in Relation to Cognitive Performance. *J Neurosci Rural Pract.* 2020; 11: 416–419. DOI: 10.1055/s-0040-1712585. PMID: 32753806.
95. Billiot K.M., Budzynski T.H., Andrasik F. EEG Patterns and Chronic Fatigue Syndrome. *Journal of Neurotherapy.* 1997; 2: 20–30. DOI: 10.1300/J184v02n02\_04.
96. Hülsdünker T., Mierau A., Struëder H.K. Higher Balance Task Demands are Associated with an Increase in Individual Alpha Peak Frequency. *Front Hum Neurosci.* 2015; 9: 695. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00695. PMID: 26779005.
97. Gutmann B., Mierau A., Hülsdünker T., Hildebrand C., Przyklenk A., Hollmann W. Effects of physical exercise on individual resting state EEG alpha peak frequency. *Neural Plast.* 2015; 2015: 1–6. DOI: 10.1155/2015/717312. PMID: 25759762.
98. Gutmann B., Zimmer P., Hülsdünker T., Lefebvre J., Binneböbel S., Oberste M. The effects of exercise intensity and post-exercise recovery time on cortical activation as revealed by EEG alpha peak frequency. *Neurosci Lett.* 2018; 668: 159–163. DOI: 10.1016/j.neulet.2018.01.007. PMID: 29329910.
99. Sadaghiani S., Scheeringa R., Lehongre K., Morillon B., Giraud A-L., Kleinschmidt A. Intrinsic connectivity networks, alpha oscillations, and tonic alertness: a simultaneous electroencephalography/functional magnetic resonance imaging study. *J Neurosci.* 2010; 30: 10243–10250. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1004-10.2010. PMID: 20668207.
100. Christie S., Di Fronso S., Bertollo M., Werthner P. Individual Alpha Peak Frequency in Ice Hockey Shooting Performance. *Front Psychol.* 2017; 8: 762. DOI: 10.3389/fpsyg.2017.00762. PMID: 28559868.
101. Zhang Y., Lu Y., Wang D., Zhou C., Xu C. Relationship between individual alpha peak frequency and attentional performance in a multiple object tracking task among ice-hockey players. *PLoS One.* 2021; 16 (5): e0251443. DOI: 10.1371/journal.pone.0251443.
102. Faubert J. Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes. *Sci Rep.* 2013; 3: 1154. DOI: 10.1038/srep01154.
103. Hülsdünker T., Mierau A. Visual Perception and Visuomotor Reaction Speed Are Independent of the Individual Alpha Frequency. *Front Neurosci.* 2021; 8: 15. DOI: 10.3389/fnins.2021.620266. PMID: 33897344. MCID: PMC8060564.

Поступила в редакцию 03.04.2023; принята 28.06.2023.

#### Авторский коллектив

**Балиоз Наталья Владимировна** – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории функциональных резервов организма, ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины». 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 4; e-mail: balioznv@neuronm.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5482-5986>.

**Архипова Елизавета Евгеньевна** – аспирант, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный университет экономики и управления». 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 56; e-mail: eliz.ev.ar@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2599-5214>.

**Мозолева Наталья Владимировна** – кандидат биологических наук, доцент кафедры психологии и педагогики, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный университет экономики и управления». 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 56; e-mail: Mozolevskaya@list.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-1108-0105>.

**Кривошеков Сергей Георгиевич** – доктор медицинских наук, профессор, заведующий лабораторией функциональных резервов организма, ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины». 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 4; ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный университет экономики и управления». 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 56; e-mail: krivoschokovsg@neuronm.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2306-829X>.

#### Образец цитирования

Балиоз Н.В., Архипова Е.Е., Мозолева Н.В., Кривошеков С.Г. Электроэнцефалографические маркеры функционального состояния центральной нервной системы в спортивной практике. *Ульяновский медико-биологический журнал.* 2023; 3: 30–48. DOI: 10.34014/2227-1848-2023-3-30-48.

## ELECTROENCEPHALOGRAPHIC MARKERS OF CNS FUNCTIONAL STATE IN SPORT

N.V. Balioz<sup>1</sup>, E.E. Arkhipova<sup>2</sup>, N.V. Mozolevskaya<sup>2</sup>, S.G. Krivoshchekov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Scientific Research Institute of Neuroscience and Medicine, Novosibirsk, Russia;

<sup>2</sup> Novosibirsk State University of Economics and Management, Novosibirsk, Russia

*All over the world, sports professionals are interested in attracting new technologies to work-out sessions to increase sportsmanship. Literature reveals that EEG markers of cognitive function dynamics, sensorimotor integration, and psychological stability are important in assessing the functional state of athletes. In addition to a high level of physical fitness, elite athletes develop cognitive skills specific to a particular sport. Besides they demonstrate high sensorimotor integration, improved attention, perception and information processing and other characteristics ensuring high performance. The review systematically analyzes publications devoted to the correlation between physical activity and CNS functional state. It is established that indicators of EEG alpha rhythm power and frequency are significant neurophysiological markers of cognitive function state. These indicators contribute much to studying high- and low-intensity physical activity. The authors analyzed such databases as Medline, Web of Science, Scopus, Pubmed, Cochrane, Embase, Google Scholar, and eLIBRARY.*

**Key words:** physical activity, cognitive functions, sports results, electroencephalography, alpha rhythm.

*The work was supported by the federal budget for fundamental scientific research (subject no. 122042600140-6).*

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

### Author contributions

Literature search, data processing: Balioz N.V., Arkhipova E.E., Mozolevskaya N.V.

Data analysis and interpretation: Balioz S.G., Arkhipova E.E., Mozolevskaya N.V.

Text writing and editing: Balioz S.G., Krivoshchekov S.G.

### References

1. Fister I., Fister D., Deb S., Mlakar U., Brest J. Post hoc analysis of sport performance with differential evolution. *Neural Comput. Appl.* 2018; 1–10. DOI: 10.1007/s00521-018-3395-3.
2. Henriksen K., Storm L.K., Stambulova N., Pyrdol N., Larsen C.H. Successful and less successful interventions with youth and senior athletes: insights from expert sport psychology practitioners. *J. Clin. Sport Psychol.* 2019; 13 (1): 72–94. DOI: 10.1123/jcsp.2017-0005.
3. Dalen T., Sandmae S., Stevens T.G., Hjelde G.H., Kjørnes T.N., Wisløff U. Differences in acceleration and high-intensity activities between small-sided games and peak periods of official matches in elite soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 2021; 35 (7): 2018–2024. DOI: 10.1519/JSC.0000000000003081.
4. Yarrow K., Brown P., Krakauer J.W. Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports. *Nat. Rev. Neurosci.* 2009; 10 (8): 585–596. DOI: 10.1038/nrn2672.
5. Chang Y., Lee J.J., Seo J.H., Song H.J., Kim Y.T., Lee H.J. Neural correlates of motor imagery for elite archers. *NMR Biomed.* 2011; 24: 366–372. DOI: 10.1002/nbm.1600.
6. Zhuina D.V., Maydokina L.G. Psikhologicheskie osobennosti sportsmenov-pobediteley [Psychological characteristics of athletes-winners]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* 2014; 6: 1519–1522. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22878836> (accessed: February 20, 2023) (in Russian).
7. Vergunov E.G., Nikolaeva E.I., Balioz N.V., Krivoshchekov S.G. Lateral'nye predpochteniya kak vozmozhnye fenotipicheskie prediktory rezervov serdechno-sosudistoy sistemy i osobennosti sensomotornoy integratsii u al'pinistov [Lateral preferences as possible phenotypic predictors of the reserves of the cardiovascular system and features of sensorimotor integration in climbers]. *Fiziologiya cheloveka.* 2018; 44 (3): 97–108. DOI: 10.7868/S0131164618030116 (in Russian).
8. Zhang L., Qiu F., Zhu H., Xiang M., Zhou L. Neural Efficiency and Acquired Motor Skills: An fMRI Study of Expert Athletes. *Front Psychol.* 2019; 6 (10): 27–38. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02752. PMID: 31866917. PMCID: PMC6908492.

9. Cabeza R., Albert M., Belleville S., Craik F.I., Duarte A., Grady C.L. Maintenance, reserve and compensation: the cognitive neuroscience of healthy ageing. *Nat. Rev. Neurosci.* 2018; 19: 701–710. DOI: 10.1038/s41583-018-0068-2.
10. Dumoulin S.O., Fracasso A., Van der Zwaag W., Siero J.C., Petridou N. Ultra-high field MRI: advancing systems neuroscience towards mesoscopic human brain function. *Neuroimage.* 2018; 168: 345–357. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.01.028.
11. Fink A., Rominger C., Benedek M., Perchtold C.M., Papousek I., Weiss E.M. EEG alpha activity during imagining creative moves in soccer decision-making situations. *Neuropsychologia.* 2018; 114: 118–124. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.025.
12. Kabachkova A.V., Zakharova A.N., Krivoshechekov S.G., Kapilevich L.V. Dvigatel'naya aktivnost' i kognitivnaya deyatel'nost': osobennosti vzaimodeystviya i mekhanizmy vliyaniya [Physical and cognitive activity: Interaction and mechanisms of influence]. *Fiziologiya cheloveka.* 2022; 48 (5): 126–136. DOI: 10.31857/S0131164622700102 (in Russian).
13. Costanzo M.E., VanMeter J.W., Janelle C.M., Braun A., Miller M.W., Oldham J. Neural efficiency in expert cognitive-motor performers during affective challenge. *J. Mot. Behav.* 2016; 48: 573–588. DOI: 10.1080/00222895.2016.1161591.
14. Cheron G., Petit G., Cheron J., Leroy A., Cebolla A., Cevallos C. Brain oscillations in sport: toward EEG biomarkers of performance. *Front. Psychol.* 2016; 7: 246–271. DOI: 10.3389/fpsyg.2016.00246.
15. Chaddock-Heyman L., Erickson K.I., Voss M.W., Knech A.M., Pontifex M.B., Castelli D.M. The effects of physical activity on functional MRI activation associated with cognitive control in children: a randomized controlled intervention. *Front. Hum. Neurosci.* 2013; 7: 72. DOI: 10.3389/fnhum.201300072.
16. Fontes E.B., Okano A.H., De Guio F., Schabort E.J., Min L.L., Basset F.A. Brain activity and perceived exertion during cycling exercise: an fMRI study. *Br. J. Sport Med.* 2015; 49: 556–560. DOI: 10.1136/bjsports-2012-091924.
17. Boecker H., Drzezga A. A perspective on the future role of brain pet imaging in exercise science. *Neuroimage.* 2016; 131: 73–80. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2015.10.021.
18. Shih C.H., Moore K., Browner N., Sklerov M., Dayan E. Physical activity mediates the association between striatal dopamine transporter availability and cognition in Parkinson's disease. *Parkinsonism Relat. Disord.* 2019; 62: 68–72. DOI: 10.1016/j.parkreldis.2019.01.027.
19. Zhang L., Qiu F., Zhu H., Xiang M., Zhou L. Neural Efficiency and Acquired Motor Skills: An fMRI Study of Expert Athletes. *Front Psychol.* 2019; 6 (10): 27–38. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02752. PMID: 31866917. PMCID: PMC6908492.
20. Huang P., Fang R., Li B.Y., Chen S.D. Exercise-related changes of networks in aging and mild cognitive impairment brain. *Front. Aging Neurosci.* 2016; 8: 47. DOI: 10.3389/fnagi.2016.00047.
21. Pedersen B.K., Saltin B. Exercise as medicine – evidence for prescribing exercise as therapy in 26 different chronic diseases. *Scand J Med Sci Sports.* 2015; 25 (3): 1–72. DOI: 10.1111/sms.12581.
22. Cassilhas R.C., Tufik S., De Mello M.T. Physical exercise, neuroplasticity, spatial learning and memory. *Cell. Mol. Life Sci.* 2016; 73: 975–983. DOI: 10.1007/s00018-015-2102-0.
23. Mellow M.L., Goldsworthy M.R., Coussens S., Smith A.E. Acute aerobic exercise and neuroplasticity of the motor cortex: a systematic review. *J. Sci. Med. Sports.* 2019; 23: 408–414. DOI: 10.1016/j.jsams.2019.10.015.
24. Hicks S.D., Jacob P., Perez O., Baffuto M., Gagnon Z., Middleton F.A. The transcriptional signature of a runner's high. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2019; 51: 970–978. DOI: 10.1249/MSS.0000000000001865.
25. Sparling P.B., Giuffrida A., Piomelli D., Roskopf L., Dietrich A. Exercise activates the endocannabinoid system. *Neuroreport.* 2003; 14: 2209–2211. DOI: 10.1097/00001756-200312020-00015.
26. Skosnik P.D., Hajos M., Cortes-Briones J.A., Edwards C.R., Pittman B.P., Hoffmann W.E. Cannabinoid receptor-mediated disruption of sensory gating and neural oscillations: a translational study in rats and humans. *Neuropharmacology.* 2018; 135: 412–423. DOI: 10.1016/j.neuropharm.2018.03.036.
27. Verburch L., Scherder E.J., Van Lange P.A., Oosterlaan J. Executive functioning in highly talented soccer players. *PLoS One.* 2014; 9 (3): e91254. DOI: 10.1371/journal.pone.0091254.
28. Vestberg T., Reinebo G., Maurex L., Ingvar M., Petrovic P. Core executive functions are associated with success in young elite soccer players. *PLoS One.* 2017; 12: e0170845. DOI: 10.1371/journal.pone.0170845.

29. Policastro F., Accardo A., Marcovich R., Pelamatti G., Zoia S. Relation between motor and cognitive skills in Italian basketball players aged between 7 and 10 Years Old. *Sports (Basel)*. 2018; 6 (3): 80. DOI: 10.3390/sports6030080.
30. Qiu F., Pi Y., Liu K., Li X., Zhang J., Wu Y. Influence of sports expertise level on attention in multiple object tracking. *Peer J*. 2018; 6: e5732. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.5732>. PMID: 30280051.
31. Kudo K., Ito T., Tsutsui S., Yamamoto Y., Ishikura T. Compensatory coordination of release parameters in a throwing task. *J. Mot. Behav.* 2000; 32 (4): 337–345. DOI: 10.1080/00222890009601384.
32. Kudo K., Ohtsuki T. Adaptive variability in skilled human movements. *Inform. Media Technol.* 2008; 3 (1): 409–420. DOI: 10.1527/tjsai.23.151.
33. Davlet'yarova K.V., Nagornov M.S., Krivoshchekov S.G., Il'in A.A., Kapilevich L.V. Fiziologicheskie kharakteristiki dvigatel'nykh navykov udarnykh deystviy u futbolistov s ogranichennymi vozmozhnostyami zdorov'ya [Physiological characteristics of motor impact skills in soccer players with disabilities]. *Fiziologiya cheloveka*. 2022; 48 (2): 5–13. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48022777> (accessed: 20.02.2023). DOI: 10.31857/S0131164622010040 (in Russian).
34. Fontani G., Maffei D., Cameli S., Polidori F. Reactivity and event-related potentials during attentional tests in athletes. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 1999; 80 (4): 308–317. DOI: 10.1007/s004210050597.
35. Kudo K., Miyazaki M., Kimura T., Yamanaka K., Kadota H., Hirashima M., Nakajima Y., Nakazawa K., Ohtsuki T. Selective activation and deactivation of the human brain structures between speeded and precisely timed tapping responses to identical visual stimulus: an fMRI study. *NeuroImage*. 2004; 22 (3): 1291–1301. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2004.03.043.
36. Laurienti P.J., Burdette J.H., Wallace M.T., Yen Y.F., Field A.S., Stein B.E. Deactivation of sensory-specific cortex by cross-modal stimuli. *J. Cogn. Neurosci.* 2002; 14 (3): 420–429. DOI: 10.1162/089892902317361930.
37. Loprinzi P.D., Ponce P., Frith E. Hypothesized mechanisms through which acute exercise influences episodic memory. *Physiology International*. 2018; 105 (4): 285–297. DOI: 10.1556/2060.105.2018.4.28.
38. Rossini P.M., Di Iorio R., Bentivoglio M., Bertini G., Ferreri F., Gerloff C. Methods for analysis of brain connectivity: an IFCN-sponsored review. *Clin. Neurophysiol.* 2019; 130: 1833–1858. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.06.006.
39. Gwin J.T., Gramann K., Makeig S., Ferris D.P. Removal of movement artifact from high-density EEG recorded during walking and running. *J. Neurophysiol.* 2010; 103: 3526–3534. DOI: 10.1152/jn.00105.2010.
40. Crews D.J., Landers D.M. Electroencephalographic measures of attentional patterns prior to the golf putt. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1993; 25 (1): 116–126. DOI: 10.1249/00005768-199301000-00016.
41. Salazar W., Landers D.M., Petruzzello S.J., Han M.W., Crews D.J., Kubitz K.A. Hemispheric asymmetry, cardiac response, and performance in elite archers. *Res. Q. Exerc. Sport.* 1990; 61 (4): 351–359. DOI: 10.1080/02701367.1990.10607499.
42. Nakata H., Yoshie M., Miura A., Kudo K. Characteristics of the athletes' brain: Evidence from neurophysiology and neuroimaging (Review). *Japan Society for the Promotion of Science*. 2010; 62: 197–211. DOI: 10.1016/j.brainresrev.2009.11.006.
43. Wilson V.E., Dikman Z., Bird E.I., Williams J.M., Harmison R., Shaw-Thornton L., Schwartz G.E. EEG Topographic Mapping of Visual and Kinesthetic Imagery in Swimmers (Review). *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 2016; 41 (1): 121–127. DOI: 10.1007/s10484-015-9307-8.
44. Lubar J.F., Shouse M.N. EEG and behavioral changes in a hyperkinetic child concurrent with training of the sensorimotor rhythm (SMR): a preliminary report. *Biofeedback Self-Regul.* 1976; 1 (3): 293–306. DOI: 10.1007/BF01001170.
45. Landers D.M., Petruzzello S.J., Salazar W., Crews, D.J. The influence of electro-cortical biofeedback on performance in pre-elite archers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 1991; 23 (1): 123–129.
46. Gordon E.M., Chauvin R.J., Van A.N. A somato-cognitive action network alternates with effector regions in motor cortex. *Nature*. 2023. DOI: 10.1038/s41586-023-05964-2. PMID: 37076628.
47. Fumoto M., Oshima T., Kamiya K. Ventral prefrontal cortex and serotonergic system activation during pedaling exercise induces negative mood improvement and increased alpha band in EEG. *Behavioural Brain Research*. 2010; 213 (1): 1–9. DOI: 10.1016/j.bbr.2010.04.017.
48. Basar E. A review of alpha activity in integrative brain function: fundamental physiology, sensory coding, cognition and pathology. *Int. J. Psychophysiol.* 2012; 86 (1): 1–24. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2012.07.002.

49. Bazanova O.M., Vernon D. Interpreting EEG alpha activity. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2013; 44: 94–110. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2013.05.007.
50. Cooper N.R., Croft R.J., Dominey S.J., Burgess A.P., Gruzeliel J.H. Paradox lost? Exploring the role of alpha oscillations during externally vs. internally directed attention and the implications for idling and inhibition hypotheses. *Int. J. Psychophysiol.* 2003; 47 (1): 65–74. DOI: 10.1016/s0167-8760(02)00107-1.
51. Klimesch W., Sauseng P., Hanslmayr S. EEG alpha oscillations: the inhibition timing hypothesis. *Brain Res. Rev.* 2007; 53 (1): 63–88. DOI: 10.1016/j.brainresrev.2006.06.003.
52. Foxe J.J., Snyder A.C. The role of alpha-band brain oscillations as a sensory suppression mechanism during selective attention. *Front. Psychol.* 2011; 2: 154. DOI: 10.3389/fpsyg.2011.00154.
53. Mathewson K.E., Lleras A., Beck D.M., Fabiani M., Ro T., Gratton G. Pulsed out of awareness: EEG alpha oscillations represent a pulsed inhibition of ongoing cortical processing. *Front. Psychol.* 2011; 2: 99. DOI: 10.3389/fpsyg.2011.00099.
54. Jensen O., Bonnefond M., VanRullen R. An oscillatory mechanism for prioritizing salient unattended stimuli. *Trends Cogn. Sci.* 2012; 16: 200–206.
55. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res. Rev.* 1999; 29 (2): 169–195.
56. Thut G., Nietzel A., Brandt S.A., Pascual-Leone A. Alpha-band electroencephalographic activity over occipital cortex indexes visuospatial attention bias and predicts visual target detection. *J. Neurosci.* 2006; 26 (37): 9494–9502. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0875-06.2006.
57. Napalkov D.A., Ratmanova P.O., Salikhova R.N., Kolikov M.B. Elektroentsefalograficheskie korrelyaty optimal'nogo funktsional'nogo sostoyaniya golovnogo mozga sportsmena v strelkovom sporte [Electroencephalographic markers of optimal performance in marksmen]. *Byulleten' sibirskoy meditsiny.* 2013; 12 (2): 219–226 (in Russian).
58. Klimesch W., Doppelmayr M., Pachinger T., Russegger H. Event-related desynchronization in the alpha band and the processing of semantic information. *Cogn. Brain Res.* 1997; 6 (2): 83–94. DOI: 10.1016/s092610(97)00018-9.
59. Klimesch W., Doppelmayr M., Russegger H., Pachinger T., Schwaiger J. Induced alpha band power changes in the human EEG and attention. *Neurosci. Lett.* 1998; 244 (2): 73–76. DOI: 10.1016/s0304-3940(98)00122-0.
60. Jensen O., Tesche C.D. Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *Eur. J. Neurosci.* 2002; 15 (8): 1395–9. DOI: 10.1046/j.1460-9568.2002.01975.x.
61. Tuladhar A.M., Huurne N., Schoffelen J.M., Maris E., Oostenveld R., Jensen O. Parieto-occipital sources account for the increase in alpha activity with working memory load. *Hum. Brain Mapp.* 2007; 28 (8): 785–92. DOI: 10.1002/hbm.20306.
62. Hummel F., Andres F., Altenmüller E., Dichgans J., Gerloff C. Inhibitory control of acquired motor programmes in the human brain. *Brain.* 2002; 125 (2): 404–420. DOI: 10.1093/brain/awf030.
63. Jancke L., Lutz K., Koeneke S. Converging evidence of ERD/ERS and BOLD responses in motor control research. *Prog. Brain Res.* 2006; 159: 261–271. DOI: 10.1016/S0079-6123(06)59018-1.
64. Loze G.M., Collins D., Holmes P.S. Pre-shot EEG alpha-power reactivity during expert air-pistol shooting: a comparison of best and worst shots. *J. Sports Sci.* 2001; 19 (9): 727–733. DOI: 10.1080/02640410152475856.
65. Chernyy S.V., Mishin N.P., Nagaeva E.I. *Osobennosti elektroentsefalogrammy sportsmenov atsiklicheskikh vidov sporta* [Electroencephalogram of athletes going in for acyclic sports]. 2016; 2 (68): 45–54. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28130360> (accessed: February 20, 2023) (in Russian).
66. Soroko S.I., Trubachev V.V. *Neyrofiziologicheskie i psikhofiziologicheskie osnovy adaptivnogo bioupravleniya* [Neurophysiological and psychophysiological foundations of adaptive biofeedback]. St. Petersburg: Politekhnik-a-servis; 2010. 188 (in Russian).
67. Alekseeva M.V., Balioz N.B., Muravleva K.B., Sapina E.A., Bazanova O.M. Ispol'zovanie treninga proizvod'nogo uvelicheniya moshchnosti EEG v individual'nom vysokochastotnom al'fa-diapazone dlya uluchsheniya kognitivnoy deyatelnosti [Training for voluntary increasing individual upper  $\alpha$ -power as a method for cognitive enhancement]. *Fiziologiya cheloveka.* 2012; 6 (37): 1–10 (in Russian).
68. Bazanova O.M., Vernon D., Lazareva O.Yu., Muravleva K.B., Skoraya M.V. Vliyanie al'fa-, EMG-bioupravleniya i tekhniki proizvod'noy samoregulyatsii na pokazateli kognitivnykh funktsiy i al'fa-aktivnost'



- EEG [Influence of alpha-, EMG-biofeedback and voluntary self-regulation techniques on indicators of cognitive functions and EEG alpha-activity]. *Byulleten' sibirskoy meditsiny*. 2013; 12 (2): 36–42. DOI: 10.20538/1682-0363-2013-2-36-42 (in Russian).
69. Park J.L., Fairweather M.M., Donaldson D.I Making the case for mobile cognition: EEG and sports performance. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2015; 52: 117–130. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2015.02.014.
70. Harkness T. Psykinetics and Biofeedback: Abhinav Bindra wins India's first-ever individual Gold Medal in Beijing Olympics. *Biofeedback*. 2009; 37 (2): 48–52. DOI: 10.5298/1081-5937-37.2.48.
71. Haufler A.J., Spalding T.W., Santa Maria D.L., Hatfield B.D. Neuro-cognitive activity during a self-paced visuospatial task: Comparative EEG profiles in marksmen and novice shooters. *Biol. Psychol.* 2000; 53 (2–3): 131–160. DOI: 10.1016/S0301-0511(00)00047-8.
72. Illarionova A.V., Krivoshchekov S.G., Il'in A.A., Kapilevich L.V. Fiziologicheskie osobennosti formirovaniya dvigatel'noy koordinatsii na osnove trenirovok s biologicheskoy obratnoy svyaz'yu [Physiological features of motor coordination formation based on training with biological feedback]. *Fiziologiya cheloveka*. 2022; 48 (4): 5–21. DOI: 10.31857/S013116462204004X (in Russian).
73. Del Percio C., Infarinato F., Marzano N., Iacoboni M., Aschieri P., Lizio R., Soricelli A., Limatola C., Rossini P.M., Babiloni C. Reactivity of alpha rhythms to eyes opening is lower in athletes than non-athletes: a highresolution EEG study. *Int. J. Psychophysiol.* 2011; 82 (3): 240–247. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2011.09.005.
74. Ermutlu N., Yücesir I., Eskikurt G., Temel T. Brain electrical activities of dancers and fast ball sports athletes are different. *Cogn. Neurodyn.* 2015; 9 (2): 257–263. DOI: 10.1007/s11571-014-9320-2.
75. Baumeister J., von Detten S., van Niekerk S.M., Schubert M., Ageberg E., Louw Q.A. Brain activity in predictive sensorimotor control for landings: an EEG pilot study. *Int J Sports Med.* 2013; 34 (12): 1106–1111. DOI: 10.1055/s-0033-1341437.
76. Cherapkina L.P. Osobennosti patterna EEG u sportsmenov, zanimayushchikhsya tsiklicheskim vidami sporta [EEG patterns in athletes involved in cyclic sports]. *Aktual'nye problemy adaptivnoy fizicheskoy kul'tury i sporta: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Topical problems of adaptive physical culture and sports: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference]. February 17–18, 2016. Omsk; 2016: 291–299 (in Russian).
77. Tsai C.L., Chen F.C., Pan C.Y., Wang C.H., Huang T.H., Chen T.C. Impact of acute aerobic exercise and cardiorespiratory fitness on visuospatial attention performance and serum BDNF levels. *Psychoneuroendocrinol.* 2014; 41: 121–131. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2013.12.014.
78. Balioz N.V., Krivoshchekov S.G. Individual'no-tipologicheskie osobennosti EEG sportsmenov pri ostrom gipoksicheskom vozdeystvii [Individual typological features in the EEG of athletes after acute hypoxic treatment]. *Fiziologiya cheloveka*. 2012; 38 (5): 24–32 (in Russian).
79. Jann K., Koenig T., Dierks T., Boesch C., Federspiel A. Association of individual resting state EEG alpha frequency and cerebral blood flow. *Neuroimage*. 2010; 51: 365–72. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.02.024. PMID: 20156573.
80. Grandy T.H., Werkle-Bergner M., Chicherio C., Schmiedek F., LoËvderm M., Lindenberger U. Peak individual alpha frequency qualifies as a stable neurophysiological trait marker in healthy younger and older adults. *Psychophysiology*. 2013; 50: 570–582. DOI: 10.1111/psyp.12043.
81. Bodenmann S., Rusterholz T., Dürr R., Stoll C., Bachmann V., Geissler E., Jaggi-Schwarz K., Landolt H.-P. The functional Val158Met polymorphism of COMT predicts interindividual differences in brain  $\alpha$  oscillations in young men. *J. Neurosci.* 2009; 29: 10855–10862. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1427-09.2009.
82. Smit C.M., Wright M.J., Hansell N.K., Geffen G.M., Martin N.G. Genetic variation of individual alpha frequency (IAF) and alpha power in a large adolescent twin sample. *Int. J. Psychophysiol.* 2006; 61 (2): 235–243. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2005.10.004.
83. Klimesch W., Schimke H., Pfurtscheller G. Alpha frequency, cognitive load and memory performance. *Brain Topography*. 1993; 5: 241–51. DOI: 10.1007/BF01128991. PMID: 8507550.
84. Christie S., Di Fronso S., Bertollo M., Werthner P. Individual Alpha Peak Frequency in Ice Hockey Shooting Performance. *Front Psychol.* 2017; 8: 762. DOI: 10.3389/fpsyg.2017.00762. PMID: 28559868.
85. Bherer L., Erickson K.I., Liu-Ambrose T. A review of the effects of physical activity and exercise on cognitive and brain functions in older adults. *J. Aging Res.* 2013; 2013: 657508. DOI: 10.1155/2013/657508.

86. Kramer A.F., Colcombe S. Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study- revisited. *Perspect. Psychol. Sci.* 2018; 13: 213–217. DOI: 10.1111/1467-9280.t01-1-01430.
87. Crespillo-Jurado M., Delgado-Giralt J., Reigal R.E., Rosado A., Wallace-Ruiz A., Juárez Ruiz de Mier R. Body composition and cognitive functioning in a sample of active elders. *Front. Psychol.* 2019; 10: 1569. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.01569.
88. Zhu W., Wadley V.G., Howard V.J., Hutto B., Blai S.N., Hooker S.P. Objectively Measured Physical Activity and Cognitive Function in Older Adults. *Med. Sci. Sport Exerc.* 2017; 49: 47–53. DOI: 10.1249/MSS.0000000000001079.
89. Gul'tyaeva V.V., Zinchenko M.I., Uryumtsev D.Yu., Krivoshchekov S.G., Aftanas L.I. Fizicheskaya nagruzka pri lechenii depressii. Fiziologicheskie mekhanizmy [Exercise for depression treatment. Physiological mechanisms]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova.* 2019; 119 (7): 112–119. DOI: 10.17116/jnevro2019119071112 (in Russian).
90. Gul'tyaeva V.V., Zinchenko M.I., Uryumtsev D.Yu., Krivoshchekov S.G., Aftanas L.I. Fizicheskaya nagruzka pri lechenii depressii. Rezhimy i vidy nagruzki [Exercise for depression treatment. Exercise modalities Modes and types]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova.* 2019; 119 (9): 136–142. DOI: 10.17116/jnevro2019119091136 (in Russian).
91. Jin Y., O'Halloran J.P., Plon L., Sandman C.A., Potkin S.G. Alpha EEG predicts visual reaction time. *Int. J. Neurosci.* 2006; 116: 1035–1044. DOI: 10.1080/00207450600553232. PMID: 16861166.
92. Basar E., Yordanova J., Kolev V., Basar-Eroglu C. Is the alpha rhythm a control parameter for brain responses? *Biological Cybernetics.* 1997; 76: 471–80. DOI: 10.1007/s004220050360. PMID: 9263433.
93. Bornkessel I.D., Fiebach C.J., Friederici A.D., Schlesewsky M. "Capacity" reconsidered: interindividual differences in language comprehension and individual alpha frequency. *Exp Psychol.* 2004; 51: 279–289. DOI: 10.1027/1618-3169.51.4.279. PMID: 15620229.
94. Rathee S., Bhatia D., Punia V., Singh R. Peak Alpha Frequency in Relation to Cognitive Performance. *J Neurosci Rural Pract.* 2020; 11: 416–419. DOI: 10.1055/s-0040-1712585. PMID: 32753806.
95. Billiot K.M., Budzynski T.H., Andrasik F. EEG Patterns and Chronic Fatigue Syndrome. *Journal of Neurotherapy.* 1997; 2: 20–30. DOI: 10.1300/J184v02n02\_04.
96. Hülzdünker T., Mierau A., Strüder H.K. Higher Balance Task Demands are Associated with an Increase in Individual Alpha Peak Frequency. *Front Hum Neurosci.* 2015; 9: 695. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00695. PMID: 26779005.
97. Gutmann B., Mierau A., Hülzdünker T., Hildebrand C., Przyklenk A., Hollmann W. Effects of physical exercise on individual resting state EEG alpha peak frequency. *Neural Plast.* 2015; 2015: 1–6. DOI: 10.1155/2015/717312. PMID: 25759762.
98. Gutmann B., Zimmer P., Hülzdünker T., Lefebvre J., Binneböbel S., Oberste M. The effects of exercise intensity and post-exercise recovery time on cortical activation as revealed by EEG alpha peak frequency. *Neurosci Lett.* 2018; 668: 159–163. DOI: 10.1016/j.neulet.2018.01.007. PMID: 29329910.
99. Sadaghiani S., Scheeringa R., Lehongre K., Morillon B., Giraud A-L., Kleinschmidt A. Intrinsic connectivity networks, alpha oscillations, and tonic alertness: a simultaneous electroencephalography/functional magnetic resonance imaging study. *J Neurosci.* 2010; 30: 10243–10250. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1004-10.2010. PMID: 20668207.
100. Christie S., Di Fronso S., Bertollo M., Werthner P. Individual Alpha Peak Frequency in Ice Hockey Shooting Performance. *Front Psychol.* 2017; 8: 762. DOI: 10.3389/fpsyg.2017.00762. PMID: 28559868.
101. Zhang Y., Lu Y., Wang D., Zhou C., Xu C. Relationship between individual alpha peak frequency and attentional performance in a multiple object tracking task among ice-hockey players. *PLoS One.* 2021; 16 (5): e0251443. DOI: 10.1371/journal.pone.0251443.
102. Faubert J. Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes. *Sci Rep.* 2013; 3: 1154. DOI: 10.1038/srep01154.
103. Hülzdünker T., Mierau A. Visual Perception and Visuomotor Reaction Speed Are Independent of the Individual Alpha Frequency. *Front Neurosci.* 2021; 8: 15. DOI: 10.3389/fnins.2021.620266. PMID: 33897344. MCID: PMC8060564.

**Information about the authors**

**Balioz Natal'ya Vladimirovna**, Candidate of Sciences (Biology), Researcher, Laboratory of Body Functional Reserves, Scientific Research Institute of Neuroscience and Medicine. 630117, Russia, Novosibirsk, Timakov St., 4; e-mail: balioznv@neuronm.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5482-5986>.

**Arkhipova Elizaveta Evgen'evna**, Postgraduate Student, Novosibirsk State University of Economics and Management. 630099, Russia, Novosibirsk, Kamenskaya St., 56; e-mail: eliz.ev.ar@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2599-5214>.

**Mozolevskaya Natal'ya Vladimirovna**, Candidate of Sciences (Biology), Associate Professor, Chair of Psychology and Pedagogy, Novosibirsk State University of Economics and Management. 630099, Russia, Novosibirsk, Kamenskaya St., 56; e-mail: Mozolevskaya@list.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-1108-0105>.

**Krivoshchekov Sergey Georgievich**, Doctor of Sciences (Medicine), Professor, Head of the Laboratory of Functional Reserves of the Body, Scientific Research Institute of Neuroscience and Medicine. 630117, Russia, Novosibirsk, Timakov St., 4; Novosibirsk State University of Economics and Management. 630099, Russia, Novosibirsk, Kamenskaya St., 56; e-mail: krivoschokovsg@neuronm.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2306-829X>.

**For citation**

Balioz N.V., Arkhipova E.E., Mozolevskaya N.V., Krivoshchekov S.G. Elektroentsefalograficheskie markery funktsional'nogo sostoyaniya tsentral'noy nervnoy sistemy v sportivnoy praktike [Electroencephalographic markers of CNS functional state in sport]. *Ul'yanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal*. 2023; 3: 30–48. DOI: 10.34014/2227-1848-2023-3-30-48 (in Russian).