

УДК 612.821

ИССЛЕДОВАНИЕ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЕНСОМОТОРНОЙ ИНТЕГРАЦИИ ПРИ ПТСР. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МИШЕНЕЙ ДЛЯ БИОУПРАВЛЕНИЯ

© 2024 г. О. М. Базанова^{1, 2, *}, Н. В. Балиоз³, С. А. Ермолаева⁴, А. В. Захаров⁵,
А. А. Зонов⁶, И. В. Ларькова⁷, Т. А. Марьяновская⁸, А. А. Мельников⁹, Е. Д. Николенко¹,
Э. П. Плотникова¹⁰, П. Д. Рудыч⁸, И. В. Широлапов⁵

¹ФИЦ ФТМ НИИ молекулярной биологии и биофизики, Новосибирск, Россия

²Московский физико-технический институт, Московская область, Долгопрудный, Россия

³ФГБНУ НИИ нейронаук и медицины, Новосибирск, Россия

⁴Санкт-Петербургский институт восточных методов реабилитации, Санкт-Петербург, Россия

⁵ФГБОУ ВО Самарский государственный медицинский университет МЗ РФ, Самара, Россия

⁶ООО "Нейроботикс", Зеленоград, Россия

⁷ГУ ЛНР Луганский республиканский центр экстренной медицинской помощи и медицины катастроф,
Луганск, ЛНР, Россия

⁸ФГАОУ ВО Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Новосибирск, Россия

⁹ФГБОУ ВО Российский университет спорта "ГЦОЛИФК", Москва, Россия

¹⁰ГУ ЛНР "Луганский государственный медицинский университет имени Святителя Луки",
Луганск, ЛНР, Россия

*E-mail: bazanova_olgamih@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2023 г.

После доработки 11.11.2023 г.

Принята к публикации 24.11.2023 г.

Актуальной медико-социальной проблемой является посттравматическое стрессовое расстройство (ПТСР), патогенез которого тесно связан с нарушением эффективности сенсомоторной интеграции (СМИ). Эффективность терапии психосоматических нарушений у пациентов с ПТСР может быть повышена с помощью восстановления нормальной сенсомоторной интеграции. В данном обзоре рассматриваются различные вегетативные, электрофизиологические и поструральные маркеры высокой сенсомоторной интеграции у высококвалифицированных спортсменов и музыкантов, а также их нарушение у лиц с ПТСР. Установлено, что к наиболее доступным и информативным показателям СМИ относятся: повышение мощности электроэнцефалограммы в индивидуально определенном высокочастотном α -поддиапазоне, снижение скорости колебания тела и энергозатрат для поддержания вертикальной позы и уменьшение электромиографической активности мышц, не задействованных в решении двигательных-когнитивных двойных задач. В дальнейшем планируется использовать данные показатели с целью диагностики нарушений и разработки технологии восстановления СМИ у пациентов с ПТСР.

Ключевые слова: сенсомоторный контроль, координация, посттравматическое стрессовое расстройство, биологическая обратная связь, когнитивные функции, эмоции, стресс, вегетативные функции, электроэнцефалография, электромиография, стабилография.

DOI: 10.31857/S0131164624030061, **EDN:** BUNHPP

Психо-функциональная целостность организма обеспечивается механизмом взаимодействия тела и мозга с окружающей средой. Этот механизм основан на сенсомоторной обратной связи,

которая предназначена для "сравнения ожидаемой сенсорной информации, поступающей из окружающей среды в результате поведения, с тем, что возвращается" [1]. Автоматизм выпол-

нения когнитивных и психомоторных задач предполагает достижение сенсомоторной интеграции (СМИ), при которой "процессы строятся по иерархическому принципу с использованием прямых и обратных связей, программ, *оптимизирующих функции*" с целью достижения эффекта при минимизации усилий [2].

В настоящее время установлено, что нарушение системы СМИ является основной причиной возникновения как эмоциональных [3], так и соматических нарушений при стрессовых расстройствах, включая посттравматическое стрессовое расстройство (ПТСР) [4, 5].

Согласно методическим рекомендациям Национального медицинского исследовательского центра психиатрии и неврологии им. В.М. Бехтерева (г. Санкт-Петербург), разработанным в 2022 г., а также по данным зарубежной литературы, ПТСР поражает почти 20% ветеранов боевых действий [6–8]. Помимо борьбы с тяжелыми симптомами, люди с ПТСР склонны к ухудшению функционирования всех систем организма, условий жизни и снижению удовлетворенности жизнью [8–10]. Между тем, предполагаемые финансовые затраты на ПТСР, связанные с лечением, суицидом и потерями производительности, колеблются от 4 до 6.2 млрд долл. [11]. Ущерб, нанесенный благополучию ветеранов, их семьям и социуму, делает ПТСР глобальной проблемой общественного здравоохранения.

Несмотря на высокую распространенность ПТСР во всем мире и его изнурительную психопатологию [9], до 40% пациентов с ПТСР могут не реагировать на передовые методы лечения, такие как психотерапия или фармакотерапия [12–14]. Поэтому крайне важно разработать новые, нейробиологические немедикаментозные методы реабилитации, которые будут более точно нацелены на нейронные механизмы сенсомоторной интеграции, связанные с ПТСР [15–17]. Внедрение таких методов подразумевает использование высокоточных компьютерных технологий типа "Мозг-компьютер-интерфейс" (*Brain-Computer-Interface, BCI*) и биоуправление (*Biofeedback*), что предполагает знание измеряемых психофизиологических характеристик оптимального функционирования и сенсомоторной интеграции, которое необходимо для: 1) построения предиктивной модели тренинга сенсомоторной интеграции, 2) использования наиболее валидных измеряемых психофизиологических характеристик СМИ для тренинга преодоления симптомов ПТСР. Основной задачей технологии биоуправления, основанной на принципах обратной связи, является обучение саморегуляции с помощью освоения навыков "ощущения неосознаваемых прежде функций организма и их произвольной модификации" [18].

Однако эффективность технологии биоуправления зависит от множества индивидуальных психофизиологических и методических факторов, среди которых неспецифический показатель времени задержки сигнала обратной связи имеет особое значение для достижения успеха тренинга [19]. Именно поэтому, биоуправление, организованное по физиологическим параметрам, дискретизация которых составляет меньше 10 Гц, таких, как частота сердечных сокращений (ЧСС), частота дыхания (ЧД), функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) и т.д., может не достигать требуемой эффективности [19, 20]. Поэтому, мы считаем, что биоуправление по сигналам электроэнцефалографии (ЭЭГ), электромиографии (ЭМГ), стабิโลграфии (СТГ) может быть более эффективно. К тому же эти параметры могут служить адекватными измеряемыми показателями достижения сенсомоторной интеграции [21].

Настоящий обзор литературы предпринят с целью поиска наиболее информативных измеряемых показателей нарушения СМИ при ПТСР, которые можно было бы использовать в качестве мишеней для тренинга биоуправления. Представлены данные о психологических, вегетативных, ЭЭГ-, ЭМГ- и СТГ-параметрах, которые ассоциируют с состоянием достижения сенсомоторной интеграции. Обсуждаются литературные данные и собственные результаты изучения оптимального функционирования лиц тех профессий, деятельность которых связана с необходимостью автоматизировать свои действия — решать когнитивные, психомоторные и/или творческие задачи с минимальными затратами нейрональных и вегетативных ресурсов, т.е. данные о СМИ у мастеров высшего класса в спортивной [22, 23] и музыкально-исполнительской деятельности [24, 25]. Были собраны имеющиеся в литературе сведения о том, что известно об изменении СМИ по измеряемым психологическим, автономным, ЭЭГ-, ЭМГ- и СТГ-показателям при ПТСР.

Методы

Для обзора исследований, посвященных изучению психофизиологических коррелят сенсомоторной интеграции при ПТСР, поиск литературы проводили по ключевым словам: "сенсомоторный", "интеграция", "координация", "саморегуляция", "самоконтроль", "контроль", "опорная", "когнитивный", "психомоторный", "афферентация", в сочетании с такими ключевыми словами, как "оптимальное функционирование", "тревожность", "стресс", "посттравматическое стрессовое расстройство", "ПТСР", "когнитивные функции", "память", "внимание", "эмоции", "двойные задачи", "спортсмены", "музыканты", "электро-

энцефалография", "электромиография", "стабилография".

Поиск литературы был проведен в соответствии с рекомендациями "Предпочтительных элементов отчетности для систематических обзоров и метаанализов" *PRISMA* и полагался на методы поиска литературы, описанные в консорциуме *RELISH (Relevant Literature Search)* [26]. Поиск проводили в базах данных *Web of Science*, *PubMed*, *Scopus*, *РИНЦ*. В настоящий обзор мы включили результаты, опубликованные в статьях, имеющих цифровой идентификатор объекта (*DOI, digital object identifier*), соответствующие ключевым словам, не вносили результаты исследований, проводившихся на отдельных случаях без контроля и опубликованных только в виде тезисов.

Психофизиологические признаки сенсомоторной интеграции при оптимальном функционировании

Почти 100 лет назад Николай Александрович Бернштейн (1926) представил теорию построения движений, подразумевая, что СМИ лежит в основе механизма оптимизации активности не только двигательных функций, но и всех систем организма, при которой выполнение максимально эффективного действия (не только моторного) сопровождается минимальной активацией данной системы [27]. Руководящий принцип СМИ проявляется как функциональная триада: обратная связь — синхронизация — пластичность [1, 28]. Сенсомоторная интеграция предполагает оптимальное функционирование, когда система "тело-мозг" стремится сократить энергетические затраты на какое-либо действие, минимизируя ошибку прогноза, возникающую в результате несоответствия между прогнозом "сверху вниз" и сенсорной информацией "снизу вверх" [29–31].

Изучение сенсомоторной интеграции, как процесса взаимной координации сенсорных и моторных компонентов когнитивной и психо-моторной деятельности посредством системы обратных связей или сенсорных коррекций [1, 27], подразумевает исследование взаимосвязи между психометрическими, стабилметрическими, электрофизиологическими показателями активности центральной (ЦНС) и автономной нервной системы.

Психологические характеристики СМИ. Оптимальное функционирование с психологической точки зрения тесно связано с понятием психического здоровья — состояния психического благополучия, которое характеризуется отсутствием болезненных психических проявлений, обеспечивающее адекватную условиям окружающей действительности регуляцию поведения и деятельности [32]. К психологическим характеристикам оптимального функционирования человека

относятся хорошо известные показатели: концентрация внимания, объем оперативной памяти, качество сна, когнитивная и психомоторная работоспособность, в частности, беглость выполнения когнитивных и моторных задач [33], интерес к жизни и творчеству, низкий уровень тревоги, страха, беспокойства, раздражительности и гнева, психологическая гибкость [34, 35] и психологическая устойчивость [36–38]. Психологическая гибкость подразумевает, что человек не пытается избегать сложностей или негативных событий, но контролирует и использует данный опыт для личностного развития [34, 35]. Психологическая устойчивость — это достаточно широкий спектр положительных качеств, позволяющих эффективно управлять неожиданными изменениями и даже тяжелым стрессом [36–38].

Вегетативные показатели оптимального функционирования. Соматическое здоровье обеспечивается нормальным функционированием организма на всех уровнях его организации, которые способствуют индивидуальному выживанию, воспроизводству и динамическому равновесию [39]. К соматическим признакам здоровья относятся нормальные показатели артериального давления, ЧСС, ЧД, отсутствие приливов жары-холода, потливости, ощущений внутренней дрожи, озноба, сердцебиения, и пр. [40]. Все вегетативные функции регулируются физиологическими механизмами со сложной обратной связью, где задействованы не только вегетативная нервная система (ВНС), ядра ствола мозга, лимбическая система, но и кора больших полушарий и нейро-эндокринная система [41].

Следует обратить внимание на функцию дыхания, которая является единственной вегетативной функцией, поддающейся произвольному контролю. Контролируя паттерн дыхания, можно модулировать вариабельность сердечного ритма (ВСР), чувствительность хеморецепторов и барорефлексов, а также уровень возбудимости ЦНС [42–44]. Дыхание с удлинением выдоха реализует эффект дыхательной синусовой аритмии, удлиняя время активации блуждающего нерва [43, 45, 46], с параллельным снижением нейрональной и мышечной активации [47, 48]. Так, нами было показано, что высококвалифицированные бегуны обладают более совершенными механизмами межсистемной координации за счет повышения точности кардиореспираторной регуляции. Такое усиление связи между двумя системами, синергетически работающими над одной функцией, может служить дополнительным признаком для прогнозирования уровня сенсомоторной интеграции [49].

Вышеперечисленные психологические и вегетативные признаки СМИ хорошо характеризуют состояние оптимального функционирования,

но использование их в технологии биоуправления в качестве сигнала обратной связи, не представляется целесообразным вследствие их гипервариабельности [50] и малой частоты дискретизации [20]. Однако они могут служить в качестве надежных параметров, контролирующих оптимальное функционирование.

ЭЭГ-показатели сенсомоторной интеграции. Обзор литературы, проведенный нами в 2014 г. [51] о психофизиологической интерпретации ЭЭГ α -волн демонстрирует, что уже с начала прошлого века известно о роли α -волн, как организуемых связь афферентного и эфферентного звеньев условного рефлекса [52], корректирующих движения за счет ритмических колебаний возбудимости элементов управляющей системы [1]. Мощность α -ритма ЭЭГ преобладает во время состояния спокойного бодрствования, связанного с усилением коркового торможения, т.е. снижением возбуждающего/тормозного отношения [53–55]. И наоборот, амплитуда α -ритма значительно ослабевает во время состояний высокого поведенческого возбуждения. Сравнение входящей информации и моторного ответа выражается в (де)синхронизации электрической α -активности таламо-кортикальных нейронов, от уровня которой зависят пластические изменения, позволяющие мозгу приспосабливаться к постоянно меняющимся требованиям окружающей среды [51].

Интересно отметить, что у спортсменов высокой квалификации мощность α -ритма повышена, по сравнению с начинающими тренировки, как во время спокойного бодрствования с закрытыми глазами, так и во время зрительной активации [56]. Более того, у спортсменов и музыкантов высокого уровня мастерства α -мощность не снижается, а даже растет во время или непосредственно перед выполнением эффективных профессиональных действий, таких как прицеливание у стрелков [22, 57], исполнение музыки у музыкантов [24, 25]. Эти данные указывают на то, что у высококвалифицированных спортсменов и музыкантов доминирует α -ритм в коре головного мозга, что отражает синхронизацию пирамидальных нейронов мозга и обуславливает высокую степень готовности к эффективным решениям когнитивных и психомоторных задач.

Одновременные исследования ЭЭГ-фМРТ показали, что α -флуктуации положительно коррелируют с активностью в сети режима *DMN* (*default mode net*), отвечающей за автоматизм действий [58, 59]. Другими словами, доминирование мощности α -ритма ЭЭГ — это состояние с автоматическим подсознательным решением различных задач, когда процесс обработки информации, формирование программы действий и сама реализация действий выполняется быстро, экономно, с наи-

меньшими энергозатратами, т.е. без вовлечения в процесс обработки информации дополнительных мозговых структур, которые замедляют эти процессы. Иными словами подтверждается предположение Н.А. Бернштейна об участии α -волн в самореферентной обработке информации [60] при наименьших когнитивных усилиях [61]. При этом эндофенотипические нейрофизиологические характеристики, такие как индивидуальная частота α -пика, могут модулировать обучаемость в овладении навыками сенсомоторной интеграции [51, 62].

Таким образом, увеличение частоты α -пика и доминирование высокочастотного поддиапазона α -ритма на электроэнцефалограмме у спортсменов и/или музыкантов является маркером высокоэффективной деятельности. Иллюстрацией этого положения служат результаты эффективного биоуправления, когда успех в тренинге сопровождается увеличением частоты α -пика и снижением избыточной активации [23, 51].

ЭМГ-показатели сенсомоторной интеграции. Теория Бернштейна о необходимости сенсомоторной интеграции в построении движения была доказана на примере координации и изменения активности мышц при выполнении различных двигательных задач [2]. При моторной активации амплитуда ЭМГ-сигнала увеличивается синхронно в различных мышцах, участвующих в движении. В моделях с деафферентацией животных показано, что напряжение мышц и мышечная синергия сохраняются, но координация мышц и активация ЭМГ для решения данной двигательной задачи ослабевает [63], что указывает на центральную организацию мышечного сокращения [64] и роль сигналов обратной связи от проприорецепторов для осуществления сенсомоторной интеграции. Высокопрофессиональные спортсмены и музыканты во время выполнения движений, требующих точной координации, не используют мышцы, не участвующие в решении данной двигательной задачи, что свидетельствует о высокой степени сенсомоторной интеграции [65, 66]. Кроме того, при неуспешном осуществлении движения вовлекаются мышцы, которые не должны участвовать в двигательном акте [67], что сопровождается повышением психоэмоционального напряжения и отражается в увеличении ЭМГ-мощности не только мышц, выполняющих действие, но даже мышц лба и мышцы, напрягающей апоневроз (надчерепной мышцы) [68–71].

Таким образом, ЭМГ-активность от мышц, не участвующих в выполнении целевого движения, может рассматриваться в качестве релевантного маркера сенсомоторной интеграции.

Стабилометрические показатели сенсомоторной интеграции. Система поддержания равнове-

сия — одно из наиболее общих проявлений СМИ [72, 73], которая, как известно, является эволюционно базисной для формирования когнитивных и психомоторных функций человека [74]. Изучение психофизиологических механизмов постурального контроля началось с основополагающих трудов Н.А. Бернштейна [1] и В.С. Гурфинкеля [75], определявших постуральный контроль, как один из наиболее общих примеров сенсомоторной интеграции, осуществляемый с помощью механизма обратной связи [1]. Характерным СТГ признаком сенсомоторной интеграции является снижение отклонения центра давления (ОЦД) и энергетических затрат на поддержание равновесия [76]. Чаще всего оценка постурального контроля осуществляется на основе измерения ОЦД [77] не только в покое, но и при проведении постурально-когнитивных тестов с двойными задачами. В настоящее время установлено, что тестирование выполнения двойных постурально-когнитивных и/или постурально-моторных задач служит надежной моделью исследования СМИ [78–80]. Тренинг устойчивости равновесия может влиять на беглость и эффективность решения этих задач [81, 82]. Так, у спортсменов с высокой СМИ, скорость колебания ОЦД ниже, чем у не спортсменов [83]. При этом наибольшая устойчивость отмечается у спортсменов тех видов, где соревновательные условия требуют высокой стабильности позы, например, у стрелков или гимнастов [83]. Кроме того, одновременное решение когнитивной задачи (реакции выбора на звуковой сигнал) в меньшей мере изменяет ОЦД у стрелков, чем у не спортсменов [22]. Это указывает на снижение когнитивных усилий, затрачиваемых на контроль баланса, что свидетельствует о большем уровне автоматизма регуляции позы и СМИ [84]. Об этом же свидетельствуют данные исследования динамики изменения мощности α -ритма ЭЭГ при смене позы: от положения сидя к положению стоя, или от стояния на двух ногах к положению стоя на одной ноге [57]. Оказалось, что спортсмены, тренирующие функцию равновесия: каратисты, фехтовальщики, гимнасты, спортсмены айкидо, в отличие от спортсменов динамических видов спорта, способны поддерживать баланс, не снижая мощность ЭЭГ в высокочастотном диапазоне α -ритма [57, 81], которая является одним из надежных нейрофизиологических предикторов эффективности кортикоталамических обратных связей [85–88], т.е. СМИ.

Таким образом, измерения ОЦД, мощность в индивидуально определяемом высокочастотном α -поддиапазоне ЭЭГ и ЭМГ мышц, которые не участвуют в осуществлении движения, отклонения центра давления и энергетические затраты на поддержание равновесия, могут служить надежным маркерами эффективности СМИ.

ПТСР как модель нарушения сенсомоторной интеграции

Нарушение механизма обратной связи между афферентной информацией, процессами, участвующих в ее переработке, и исполнительными звеньями сенсомоторной интеграции лежит в основе ряда психиатрических заболеваний [75, 89, 90]. Участие или даже проживание в зоне военных действий, сопровождающееся травматическими переживаниями, может приводить к развитию посттравматического стрессового расстройства. Клиническая картина ПТСР сопровождается эпизодами навязчивых воспоминаний, избегания стимулов, связанных с травмой, на фоне обилия негативных изменений в когнитивной и эмоциональной сфере [91]. Повышенное возбуждение является центральным патофизиологическим фактором посттравматического стрессового расстройства. При этом клиническая картина обуславливается патогенезом и этиологией ПТСР. В одних случаях преобладает тревожность и страх повторных переживаний, а в других — ангедонические или дисфорические состояния [91], сопровождающиеся диссомническими расстройствами в виде инсомнии [92] и ночными кошмарами [93]. Предполагается, что одним из основных факторов патогенеза ПТСР, опосредующих возникновение как эмоциональных [3], так и вегетативных нарушений, является сенсомоторная дезинтеграция [4, 5].

Психологические показатели нарушения сенсомоторной интеграции при ПТСР. Повышенная сенсорная чувствительность (гиперсенситивность) и, как следствие, сенсорное избегание являются ведущими психологическими признаками ПТСР [94]. Гиперсенситивность связана с такими психологическими и психофизиологическими характеристиками как: повышение уровня *arousal*, повышенная бдительность, раздражительность, проблемы с вниманием и беспокойством, "гиперреактивная" ВНС [95, 96].

Согласно некоторым исследованиям, данные нарушения у лиц с ПТСР связаны с аномальной обработкой сенсорных сигналов на разных уровнях ЦНС — ретикулярных ядер ствола мозга, усиления активности лимбических структур (в частности, миндалевидного тела), гипоталамуса и префронтальной коры [97, 98], что может ассоциироваться с недостаточной эффективностью саморегуляции [98].

Другой распространенный симптом ПТСР — сенсорная перегрузка, которая выражается в том, что человек воспринимает большее количество сигналов, чем его мозг способен отсортировать или обработать в единицу времени [99]. К симптомам сенсорной перегрузки относят следующие психологические и психофизиологические признаки: нарушения концентрации внимания

в связи с наличием нескольких раздражителей, повышенная раздражительность и возбуждение, увеличение тревоги, беспокойства, страха, увеличение тактильной чувствительности [100].

Таким образом, для диагностики и оценки клинической эффективности, биоуправления, направленного на тренинг СМИ, необходимо дифференцировать причину гипервозбудимости, которая может проявляться изменениями как в когнитивной, так и эмоциональной сфере, определяющих дуальность клинических симптомов.

Вегетативные признаки нарушения сенсомоторной интеграции при ПТСР. Установлено, что у пациентов с ПТСР, по сравнению со здоровыми лицами, наблюдается гиперактивность симпатической и низкая активность парасимпатической нервной системы [101], сопровождающаяся повышенной вегетативной реакцией в виде вздрагивания на внезапные громкие звуки, усиления мигательного рефлекса, снижения кожно-гальванического импеданса, повышения ЧСС [102] и, как следствие, снижение ВСР [103, 104], которая обратно пропорциональна тяжести симптомов ПТСР [105, 106]. Одним из частых симптомов ПТСР являются гипервентиляционные кризы [107]. Гипервентиляция в свою очередь вызывает гипоканию, в следствие которой возникает вазоконстрикция и нарушение мозгового кровотока.

Нарушение дыхательного паттерна является отрицательным прогностическим фактором для проведения конвенциональной терапии расстройств, связанных с тревогой (в том числе ПТСР) и, следовательно, таким пациентам требуется дополнительное вмешательство, мишенью которого должно быть дыхание [107, 108].

ЭЭГ-показатели нарушения сенсомоторной интеграции при ПТСР. Электрофизиологические исследования, направленные на изучение сенсомоторной интеграции у пациентов с ПТСР, проводились в большинстве случаев посредством оценки вызванных потенциалов (ВП), связанных с событиями [109, 110]. Было установлено, что стимулы связанные с психологической травмой, вызывали значительное усиление амплитуды когнитивного ВП (ВП -P300) [110], особенно в теменной коре [109]. В связи с тем, что увеличение амплитуды ВП соответствует повышению активации нейронных сетей и может отражать субъективную значимость стимула, эти результаты могут свидетельствовать о недостаточном распределении когнитивных ресурсов в ответ на стимулы, которые оцениваются как не угрожающие [109]. Для исследования механизма соматосенсорной дезинтеграции при ПТСР, анализировались ВП и более ранней латентности (до 150 мс), которые отражают автоматические функции произвольного внимания, связанные с фиксацией стимула

и фильтрацией сенсорной информации [110]. Ряд авторов продемонстрировали сложность в адаптации к повторяющимся слуховым и зрительным стимулам, что предполагает наличие трудностей с фильтрацией нерелевантной сенсорной информации у пациентов с ПТСР [111, 112].

Как и предполагалось, хроническая гипервозбудимость у пациентов с ПТСР сопровождается снижением мощности α -ритма ЭЭГ [60, 100, 113, 114]. Эти данные согласуются с классическими представлениями о роли α -волн в контроле взаимосвязи афферентного и эфферентного звеньев сенсомоторной интеграции [52]. Однако в большинстве этих исследований не указывается ни индивидуальная частота α -пика, являющаяся эндофенотипическим маркером нейрональной эффективности [62] и, соответственно, признаком сенсомоторной интеграции [51], ни дифференцируются изменения в индивидуально определяемых низко- и высокочастотных α -поддиапазонах ЭЭГ. Между тем, стрессовая реакция амплитуды в низко- и высокочастотных α -поддиапазонах может проявляться по-разному.

Таким образом, для выяснения тех ЭЭГ-признаков сенсомоторной дезинтеграции при ПТСР, которые можно было бы использовать в качестве мишеней нейробиоуправления, целесообразно провести дальнейшие исследования α -показателей СМИ при различных типах ПТСР.

ЭМГ-показатели нарушения сенсомоторной интеграции при ПТСР. Мы предполагаем, что гиперактивация и снижение ингибиторного контроля со стороны ЦНС [115] должна отражаться в недифференцированной мышечной реакции на внешние стрессовые воздействия увеличением мощности ЭМГ, в том числе и мышц, не участвующих в статолокомоторных функциях. Действительно, как показали исследования Т. Yoon [116], воздействие острого когнитивного стрессора, связанного с максимальной мышечной силой, приводило к быстрому мышечному утомлению, а также сопровождалось и другими показателями симпатической активации. Одной из возможных причин повышенной мышечной утомляемости у ветеранов с посттравматическим стрессовым расстройством является симпатически индуцированная вазоконстрикция мышц, уменьшающая объем перфузии крови и, следовательно, поступление кислорода к мышцам, что может сопровождаться снижением способности поддерживать субмаксимальное сокращение [116, 117].

Аналогичные результаты были получены при регистрации ЭМГ-реакции круговой мышцы глаза при сравнении пациентов с ПТСР и другими стрессовыми расстройствами [118, 119], что свидетельствует о не специфичности ЭМГ-реакции относительно когнитивного контроля [120]. С другой стороны, согласно данным J. Cacciopo

и его последователей, при психоэмоциональном напряжении увеличивается тоническое сокращение мышцы лба и мышцы, напрягающей апоневроз, которые наиболее реактивны у ветеранов с ПТСР [68, 70, 121].

Таким образом, эти ЭМГ-измерения могут служить чувствительным и неспецифическим нейробиологическим маркером избыточной мышечной активации и, соответственно, нарушения СМИ при ПТСР.

СТГ-показатели нарушения сенсомоторной интеграции при ПТСР. Интерес к системе постурального контроля при стрессовых расстройствах продиктован известными литературными данными об анатомической близости кортикальных центров поддержания равновесия и центров, участвующих в переработке эмоциональной информации, предполагающих взаимовлияние этих двух систем и сопряженность возникновения постуральных и аффективных расстройств [73, 122]. Например, было обнаружено, что базальные ганглии не только участвуют в формировании произвольных движений, таких как походка и осанка, но и в физиологической экспрессии эмоций [123].

Однако в литературе данных о нарушении стабилметрических показателей при ПТСР оказалось удивительно мало. Несмотря на это, нам удалось найти сведения о том, что при остром социальном стрессе энергетические затраты на ОЦД увеличиваются [124]. С другой стороны, по данным некоторых авторов, при модулировании персонально направленного эмоционального стресса (показ пистолета, наведенного на испытуемого) происходит снижение амплитуды колебаний центра давления, что свидетельствует о развитии у пациентов с ПТСР защитной реакции в виде замирания, сопровождающейся снижением ВСР и тахикардией [125]. При этом частота и скорость ОЦД у таких пациентов растет, по-видимому, за счет увеличения мышечной активации. Однако, если стрессовый стимул не персонифицирован, то наблюдаются совсем другие изменения СТГ у пациентов с ПТСР: амплитуда ОЦД увеличивается. Кроме того, в литературе описаны случаи развития ПТСР в результате психологических травм, полученных во время тренировок у элитных спортсменов [126]. Остается не ясным, как у этих спортсменов, с предполагаемой хорошо натренированной координацией движений, будут изменяться стабилметрические показатели при развитии ПТСР. Можно предполагать, что в любом случае энергетические затраты на поддержание равновесия будут расти, отражая сенсомоторную дезинтеграцию при ПТСР.

Таким образом, изучение нарушения постурального контроля по показателям СТГ при стрессовом расстройстве заставляет говорить о необходимости дифференцированного подхода

не только к диагностике, но и к выбору показателей для стабилметрического биоуправления у пациентов с ПТСР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературы по поиску наиболее информативных измеряемых показателей сенсомоторной интеграции и оптимального функционирования на примере лиц, обладающих высоко натренированной координацией движений, показал, что во время выполнения двойных задач происходит увеличение доминирования ЭЭГ-мощности в индивидуально определяемом — высокочастотном поддиапазоне α -ритма, снижение интегральной мощности ЭМГ-мышц, не участвующих в осуществлении целенаправленного движения, уменьшение энергетических затрат на поддержание равновесия.

По данным литературы установлено, что вне зависимости от этиологии стрессового воздействия центральным патофизиологическим фактором посттравматического стрессового расстройства является повышенное возбуждение. Для диагностики и оценки клинической эффективности биоуправления, направленного на тренинг сенсомоторной интеграции, необходимо дифференцировать причину данной гипервозбудимости. Она может проявляться изменениями как в когнитивной, так и эмоциональной сфере, определяющих дуальность клинических симптомов. Разнонаправленные изменения амплитуды колебаний ОЦД при ПТСР могут служить инструментальным маркером дуальности патогенеза стрессовых расстройств.

При анализе вегетативных нарушений при ПТСР обнаруживается однонаправленность изменений ЧСС, ВСР и ЧД при различной этиологии ПТСР. Именно поэтому эти вегетативные сигналы часто используются в технологии биоуправления для преодоления симптомов ПТСР. Но можно полагать, что недостаточная дискретизация вегетативных функций, во-первых, не позволяет учитывать дуальность патогенеза ПТСР, а во-вторых, вызывает задержку предоставления обратной связи и поэтому нецелесообразно их использование в качестве мишени биоуправления. Однако вегетативные показатели СМИ могут служить в качестве контроля терапевтической эффективности биоуправления. А стратегия произвольного удлинения выдоха, ведущая к увеличению ВСР и ЭЭГ-мощности в высокочастотном поддиапазоне α -ритма, может быть использована в качестве адьювантной при произвольной модификации мозговых и постуральных функций во время тренинга сенсомоторной интеграции в нейро- и/или стабilo-биоуправлении [127].

Анализ литературы по ЭЭГ-показателям нарушений сенсомоторных функций при ПТСР продемонстрировал надежные диагностические возможности коротко- и длинно-латентных ВП в дифференцировании различных типов стрессовых реакций. Однако можно полагать, что для эффективного биоуправления использовать ВП в качестве сигналов обратной связи, которая будет задерживаться как минимум на 30 с (время необходимое для усреднения ВП), нецелесообразно. Время задержки предоставления сигнала обратной связи в технологии биоуправления не должно превышать 500 мс.

В связи с ключевой ролью α -волн в координации активации и ингибирования кортикоталамических нейронных сетей, следовало обратить внимание именно на этот ЭЭГ-показатель СМИ. Однако α -десинхронизация в широком стандартно-используемом диапазоне ЭЭГ, о которой упоминается в работах многих авторов, не может служить надежным признаком нарушения сенсомоторной интеграции, потому что изменение амплитуды α -волн в разных низко- и высокочастотных поддиапазонах может говорить о совершенно разных событиях [128]. Так, ряд авторов установили, что увеличение тревожности [129], симптомы ирритации и повышенной болевой чувствительности [130] связаны не со снижением, а с увеличением мощности в низкочастотном поддиапазоне α -ритма. С другой стороны, десинхронизация в высокочастотном поддиапазоне α -ритма свидетельствует о когнитивной гиперреактивации [128]. Именно поэтому, до проведения тренинга нейробиоуправления целесообразно определять индивидуальные границы низкочастотного, связанного с произвольной активацией и ингибированием, и высокочастотного, связанного с произвольным контролем избыточной активации, α -диапазона, чтобы обеспечить персонифицированный подход к коррекции ПТСР с помощью биоуправления. На основании наших предыдущих исследований [81], можно предполагать, что тренинг одновременного увеличения ЭЭГ-мощности в высокочастотном α -диапазоне со снижением интегральной мощности ЭМГ-мышц лба, как показателя нарушения СМИ вне зависимости от дуальности патогенеза ПТСР, может выступать в качестве эффективной парадигмы биоуправления.

Несмотря на проведенный анализ современной литературы и результаты собственных исследований, посвященных изучению информативных показателей нарушения сенсомоторной интеграции при ПТСР, требуется дальнейшее всестороннее исследование этой проблемы и последующее практическое использование.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках темы НИР № 122032300163-9.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов в публикацию. О.М. Базанова, А.В. Захаров, И.В. Ларькова, А.А. Мельников, И.В. Широлапов — концепция. О.М. Базанова, Н.В. Балиоз, А.В. Захаров, А.А. Зонов, И.В. Ларькова, А.А. Мельников, Е.Д. Николенко, Э.П. Плотникова, П.Д. Рудыч, И.В. Широлапов — литературный поиск. П.Д. Рудыч, Т.А. Марьяновская, И.В. Широлапов — программное обеспечение. О.М. Базанова, А.В. Захаров, А.А. Мельников, Н.В. Балиоз, С.А. Ермолаева, А.А. Зонов, Е.Д. Николенко — формальный анализ. О.М. Базанова, А.В. Захаров, А.А. Мельников — курирование данных, руководство. О.М. Базанова, А.В. Захаров, А.А. Зонов, А.А. Мельников, С.А. Ермолаева, Е.Д. Николенко, И.В. Широлапов — написание/черновая подготовка. О.М. Базанова, А.В. Захаров, А.А. Мельников, Е.Д. Николенко, И.В. Широлапов — написание/обзор и редактирование. О.М. Базанова — администрирование проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М.: Медицина, 1966. 349 с.
2. Бернштейн Н.А. Общая биомеханика. М.: ЦИТ-ВЦСПС, 1926. 416 с.
3. Segawa M. Development of intellect, emotion, and intentions, and their neuronal systems // Brain Nerve. 2008. V. 60. № 9. P. 1009.
4. Ozer E.J., Best S.R., Lipsey T.L., Weiss D.S. Predictors of posttraumatic stress disorder and symptoms in adults: a meta-analysis // Psychol. Bull. 2003. V. 129. № 1. P. 52.
5. Vance M.C., Kovachy B., Dong M., Bui E. Peritraumatic distress: A review and synthesis of 15 years of research // J. Clin. Psychol. 2018. V. 74. № 9. P. 1457.
6. Ramchand R., Schell T.L., Karney B.R. et al. Disparate prevalence estimates of PTSD among service members who served in Iraq and Afghanistan: possible explanations // J. Trauma. Stress. 2010. V. 23. № 1. P. 59.
7. Sundin J., Fear N.T., Iversen A. et al. PTSD after deployment to Iraq: conflicting rates, conflicting claims // Psychol. Med. 2010. V. 40. № 3. P. 367.
8. Васильева А.В., Караваяева Т.А., Незнанов Н.Г. и др. Посттравматическое стрессовое расстройство в парадигме доказательной медицины: патогенез, клиника, диагностика и терапия: методические рекомендации / СПб. НМИЦ ПН им. В.М. Бехтерева. СПб., 2022. 33 с.
9. Benjet C., Bromet E., Karam E.G. et al. The epidemiology of traumatic event exposure worldwide: results from the World Mental Health Survey

- Consortium // Psychol. Med. 2016. V. 46. № 2. P. 327.
10. Schnurr P.P. The changing face of PTSD diagnosis // J. Trauma. Stress. 2009. V. 22. № 1. P. 1.
 11. Tanielian T., Jaycox L.H. Invisible Wounds of War: Psychological and Cognitive Injuries, Their Consequences, and Services to Assist Recovery. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2008. 424 p.
 12. Bradley R., Greene J., Russ E. et al. A multidimensional meta-analysis of psychotherapy for PTSD // Am. J. Psychiatry. 2005. V. 162. № 2. P. 214.
 13. Stein D.J., Ipser J.C., Seedat S. Pharmacotherapy for post traumatic stress disorder (PTSD) // Cochrane Database Syst. Rev. 2006. V. 2006. № 1. P. CD002795.
 14. Krystal J.H., Davis L.L., Neylan T.C. et al. It is time to address the crisis in the pharmacotherapy of posttraumatic stress disorder: a consensus statement of the PTSD Psychopharmacology Working Group // Biol. Psychiatry. 2017. V. 82. № 7. P. e51.
 15. Nicholson A.A., Harricharan S., Densmore M. et al. Classifying heterogeneous presentations of PTSD via the default mode, central executive, and salience networks with machine learning // NeuroImage. Clin. 2020. V. 27. P. 102262.
 16. Lanius R.A., Frewen P.A., Tursich M. et al. Restoring large-scale brain networks in PTSD and related disorders: a proposal for neuroscientifically-informed treatment interventions // Eur. J. Psychotraumatol. 2015. V. 6. P. 27313.
 17. Etkin A., Maron-Katz A., Wu W. et al. Using fMRI connectivity to define a treatment-resistant form of post-traumatic stress disorder // Sci. Transl. Med. 2019. V. 11. № 486. P. eaal3236.
 18. Штарк М.Б. Заметки о биоуправлении (сегодня и немного о завтра) / Биоуправление-3: Теория и практика. Новосибирск: ИМБК, 1998. С. 5.
 19. Ros T., Enriquez-Geppert S., Zotev V. et al. Consensus on the reporting and experimental design of clinical and cognitive-behavioural neurofeedback studies (CRED-nf checklist) // Brain. 2020. V. 143. № 6. P. 1674.
 20. Belinskaia A., Smetanin N., Lebedev M., Ossadtchi A. Short-delay neurofeedback facilitates training of the parietal alpha rhythm // J. Neural. Eng. 2020. V. 17. № 6. doi: 10.1088/1741-2552/abc8d7
 21. Ogden P., Pain C., Fisher J. A sensorimotor approach to the treatment of trauma and dissociation // Psychiatr. Clin. North Am. 2006. V. 29. № 1. P. 263.
 22. 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. Т. 12. № 2. С. 219.
 23. Babiloni C., Infarinato F., Marzano N. et al. Intra-hemispheric functional coupling of alpha rhythms is related to golfer's performance: a coherence EEG study // Int. J. Psychophysiol. 2011. V. 82. № 3. P. 260.
 24. Базанова О.М., Мерная Е.М., Штарк М.Б. Биоуправление в психотмоторном обучении: электрофизиологическое обоснование // Росс. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2008. Т. 94. № 5. С. 539.
 25. Петренко Т.И., Базанова О.М., Кабардов М.К. Перспективы использования биологической обратной связи для обучения музыкантов-исполнителей // Вестник РУДН. Серия: Психология и педагогика. 2019. Т. 16. № 4. С. 495.
 26. Brown P., RELISH Consortium, Zhou Y. Large expert-curated database for benchmarking document similarity detection in biomedical literature search // Database. 2019. V. 2019. P. baz085.
 27. Анохин П.К. Роль системного аспекта в разработке пограничных проблем нейрофизиологии и психологии // Биомашсистемы. 2018. Т. 2. № 4. С. 22.
 28. Tecchio F., Bertoli M., Gianni E. et al. To be is to become. fractal neurodynamics of the body-brain control system // Front. Physiol. 2020. V. 11. P. 609768.
 29. Sporns O., Edelman G.M. Solving Bernstein's problem: a proposal for the development of coordinated movement by selection // Child Dev. 1993. V. 64. № 4. P. 960.
 30. Friston K., Kiebel S. Predictive coding under the free-energy principle // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. 2009. V. 364. № 1521. P. 1211.
 31. Javadi A.-H., Beyko A., Walsh V., Kanai R. Transcranial direct current stimulation of the motor cortex biases action choice in a perceptual decision task // J. Cogn. Neurosci. 2015. V. 27. № 11. P. 2174.
 32. Абраменкова В.В., Аванесов В.С., Агамова Н.С. и др. Психология: словарь. Под общ. ред. Петровского А.В., Ярошевского М.Г. 2-е изд., испр. и доп. М.: Политиздат, 1990. 494 с.
 33. Lapenta O.M., Keller P.E., Nozaradan S., Varlet M. Spatial and temporal (non)binding of audiovisual rhythms in sensorimotor synchronisation // Exp. Brain Res. 2023. V. 241. № 3. P. 875.
 34. Hayes S.C., Luoma J.B., Bond F.W. et al. Acceptance and commitment therapy: model, processes and outcomes // Behav. Res. Ther. 2006. V. 44. № 1. P. 1.
 35. Kashdan T.B., Barrios V., Forsyth J.P., Steger M.F. Experiential avoidance as a generalized psychological vulnerability: comparisons with coping and emotion regulation strategies // Behav. Res. Ther. 2006. V. 44. № 9. P. 1301.
 36. Connor K.M., Davidson J.R.T. Development of a new resilience scale: the Connor-Davidson resilience scale (CD-RISC) // Depress. Anxiety. 2003. V. 18. № 2. P. 76.
 37. Tugade M.M., Fredrickson B.L. Resilient individuals use positive emotions to bounce back from negative emotional experiences // J. Pers. Soc. Psychol. 2004. V. 86. № 2. P. 320.

38. *Rutter M.* Resilience, competence, and coping // *Child Abuse Negl.* 2007. V. 31. № 3. P. 205.
39. *Grad F.P.* The preamble of the constitution of the World Health Organization // *Bull. World Health Organ.* 2002. V. 80. № 12. P. 981.
40. *Karim S., Chahal A., Khanji M.Y. et al.* Autonomic cardiovascular control in health and disease // *Compr. Physiol.* 2023. V. 13. № 2. P. 4493.
41. *Brown R.P., Gerbarg P.L.* Yoga breathing, meditation, and longevity // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2009. V. 1172. P. 54.
42. *Brown R.P., Gerbarg P.L., Muench F.* Breathing practices for treatment of psychiatric and stress-related medical conditions // *Psychiatr. Clin. North Am.* 2013. V. 36. № 1. P. 121.
43. *Lehrer P.M., Gevirtz R.* Heart rate variability biofeedback: how and why does it work? // *Front. Psychol.* 2014. V. 5. P. 756.
44. *Wallace T., Morris J.T., Glickstein R. et al.* Implementation of a mobile technology-supported diaphragmatic breathing intervention in military mTBI with PTSD // *J. Head Trauma Rehabil.* 2022. V. 37. № 3. P. 152.
45. *Telles M.P.D.C., Diniz-Filho J.A.F., Bastos R.P. et al.* Landscape genetics of *Physalaemus cuvieri* in Brazilian Cerrado: Correspondence between population structure and patterns of human occupation and habitat loss // *Biol. Conserv.* 2007. V. 139. № 1–2. P. 37.
46. *Röttger A., Röttger S., Grossi C. et al.* New metrology for radon at the environmental level // *Meas. Sci. Technology.* 2021. V. 32. № 12. P. 124008.
47. *Siedlecki P., Ivanova T.D., Shoemaker J.K., Garland S.J.* The effects of slow breathing on postural muscles during standing perturbations in young adults // *Exp. Brain Res.* 2022. V. 240. № 10. P. 2623.
48. *Fumoto M., Sato-Suzuki I., Seki Y. et al.* Appearance of high-frequency alpha band with disappearance of low-frequency alpha band in EEG is produced during voluntary abdominal breathing in an eyes-closed condition // *Neurosci. Res.* 2004. V. 50. № 3. P. 307.
49. *Uryumtsev D.Y., Gulyaeva V.V., Zinchenko M.I. et al.* Effect of acute hypoxia on cardiorespiratory coherence in male runners // *Front. Physiol.* 2020. V. 11. P. 630.
50. *Цейликман В.Э., Цейликман О.Б., Фекличева И.В. и др.* Психологические, нейробиологические и нейро-эндокринологические особенности синдрома посттравматических стрессовых расстройств // *Психология. Психофизиология.* 2018. Т. 11. № 4. С. 73.
51. *Bazanava O.M., Vernon D.* Interpreting EEG alpha activity // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2014. V. 44. P. 94.
52. *Ливанов М.Н.* Пространственная организация процессов головного мозга. М.: Наука, 1972. 182 с.
53. *Podvalny E., Noy N., Harel M. et al.* A unifying principle underlying the extracellular field potential spectral responses in the human cortex // *J. Neurophysiol.* 2015. V. 114. № 1. P. 505.
54. *Jensen O., Mazaheri A.* Shaping functional architecture by oscillatory alpha activity: gating by inhibition // *Front. Hum. Neurosci.* 2010. V. 4. P. 186.
55. *Haegens S., Nacher V., Luna R. et al.* α -Oscillations in the monkey sensorimotor network influence discrimination performance by rhythmic inhibition of neuronal spiking // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2011. V. 108. № 48. P. 19377.
56. *Babiloni C., Marzano N., Iacononi M. et al.* Resting state cortical rhythms in athletes: a high-resolution EEG study // *Brain Res. Bull.* 2010. V. 81. № 1. P. 149.
57. *Del Percio C., Babiloni C., Marzano N. et al.* “Neural efficiency” of athletes’ brain for upright standing: a high-resolution EEG study // *Brain Res. Bull.* 2009. V. 79. № 3–4. P. 193.
58. *Jann K., Dierks T., Boesch C. et al.* BOLD correlates of EEG alpha phase-locking and the fMRI default mode network // *Neuroimage.* 2009. V. 45. № 3. P. 903.
59. *Sadaghiani S., Scheeringa R., Lehongre K. et al.* Intrinsic connectivity networks, alpha oscillations, and tonic alertness: a simultaneous electroencephalography/functional magnetic resonance imaging study // *J. Neurosci.* 2010. V. 30. № 30. P. 10243.
60. *Beissner F., Meissner K., Bär K.-J., Napadow V.* The autonomic brain: an activation likelihood estimation meta-analysis for central processing of autonomic function // *J. Neurosci.* 2013. V. 33. № 25. P. 10503.
61. *Weber S., Aleman A., Hugdahl K.* Involvement of the default mode network under varying levels of cognitive effort // *Sci. Rep.* 2022. V. 12. № 1. P. 6303.
62. *Klimesch W.* EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis // *Brain Res. Brain Res. Rev.* 1999. V. 29. № 2–3. P. 169.
63. *Cheung V.C.K., Turolla A., Agostini M. et al.* Muscle synergy patterns as physiological markers of motor cortical damage // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2012. V. 109. № 36. P. 14652.
64. *d’Avella A., Bizzi E.* Shared and specific muscle synergies in natural motor behaviors // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2005. V. 102. № 8. P. 3076.
65. *Попов Г.И.* Управление формированием и совершенствованием двигательных действий спортсменов. М.: Триумф, 2022. 400 с.
66. *Талалай Б.Н.* Формирование исполнительских (двигательно-технических) навыков при обучении игре на музыкальных инструментах. Автореферат дис. ... канд. пед. наук: 13.00.02. М., 1982. 235 с.
67. *Voerman G.E., Sandsjö L., Vollenbroek-Hutten M.M.R. et al.* The influence of different intermittent myofeedback training schedules on learning relaxation of the trapezius muscle while performing a gross-motor task // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2004. V. 93. № 1–2. P. 57.

68. *Malmö R.B., Malmö H.P.* On electromyographic (EMG) gradients and movement-related brain activity: significance for motor control, cognitive functions, and certain psychopathologies // *Int. J. Psychophysiol.* 2000. V. 38. № 2. P. 145.
69. *Yilmaz G., Ungan P., Türker K.S.* EEG-like signals can be synthesized from surface representations of single motor units of facial muscles // *Exp. Brain Res.* 2018. V. 236. № 4. P. 1007.
70. *Cacioppo J., Bush L., Tassinary L.* Microexpressive facial actions as a function of affective stimuli: replication and extension // *Pers. Soc. Psychol. Bull.* 1992. V. 18. P. 515.
71. *Wijmsman J., Grundlehner B., Liu H. et al.* Towards mental stress detection using wearable physiological sensors // *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2011. V. 2011. P. 1798.
72. *Wright W.G., Handy J.D., Haskell A. et al.* History of mild traumatic brain injury affects static balance under complex multisensory manipulations // *J. Neurotrauma.* 2022. V. 39. № 11-12. P. 821.
73. *Meehan A., Lewandowski A., Weaver L.K. et al.* Prospective study of anxiety, post-traumatic stress and depression on postural control, gait, otolith and visuospatial function in military service members with persistent post-concussive symptoms // *Undersea Hyperb. Med.* 2019. V. 46. № 3. P. 271.
74. *Ward C.V.* Interpreting the posture and locomotion of *Australopithecus afarensis*: where do we stand? // *Am. J. Phys. Anthropol.* 2002. Suppl 35. P. 185.
75. *Гурфинкель В.С., Коц Я.М., Шик М.Л.* Регуляция позы человека. М.: Наука, 1965. 256 с.
76. *Базанова О.М., Ковалева А.В.* Исследования психофизиологических показателей постурального контроля. Вклад российской научной школы. Часть I // *Физиология человека.* 2022. Т. 48. № 2. С. 207.
77. *Sibley K.M., Howe T., Lamb S.E. et al.* Recommendations for a core outcome set for measuring standing balance in adult populations: a consensus-based approach // *PLoS One.* 2015. V. 10. № 3. P. e0120568.
78. *Leow L.-A., Rinchon C., Grahn J.* Familiarity with music increases walking speed in rhythmic auditory cuing // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2015. V. 1337. P. 53.
79. *Aftanas L.I., Bazanova O.M., Novozhilova N.V.* Posture-motor and posture-ideomotor dual-tasking: a putative marker of psychomotor retardation and depressive rumination in patients with major depressive disorder // *Front. Hum. Neurosci.* 2018. V. 12. P. 108.
80. *Leman M., Moelants D., Varewyck M. et al.* Activating and relaxing music entrains the speed of beat synchronized walking // *PLoS One.* 2013. V. 8. № 7. P. e67932.
81. *Bazanava O.M., Kholodina N.V., Nikolenko E.D. et al.* Training of support afferentation in postmenopausal women // *Int. J. Psychophysiol.* 2017. V. 122. P. 65.
82. *Chemin B., Mouraux A., Nozaradan S.* Body movement selectively shapes the neural representation of musical rhythms // *Psychol. Sci.* 2014. V. 25. № 12. P. 2147.
83. *Andreeva A., Melnikov A., Skvortsov D. et al.* Postural stability in athletes: The role of sport direction // *Gait Posture.* 2021. V. 89. P. 120.
84. *Negahban H., Aryan N., Mazaheri M. et al.* Effect of expertise in shooting and Taekwondo on bipedal and unipedal postural control isolated or concurrent with a reaction-time task // *Gait Posture.* 2013. V. 38. № 2. P. 226.
85. *Ouchi Y., Okada H., Yoshikawa E. et al.* Brain activation during maintenance of standing postures in humans // *Brain.* 1999. V. 122 (Pt. 2). P. 329.
86. *Papegaaij S., Taube W., Baudry S. et al.* Aging causes a reorganization of cortical and spinal control of posture // *Front. Aging Neurosci.* 2014. V. 6. P. 28.
87. *Meir-Hasson Y., Kinreich S., Podlipsky I. et al.* An EEG Finger-Print of fMRI deep regional activation // *Neuroimage.* 2014. V. 102. Pt. 1. P. 128.
88. *Zaback M., Missen K.J., Adkin A.L. et al.* Cortical potentials time-locked to discrete postural events during quiet standing are facilitated during postural threat exposure // *J. Physiol.* 2023. V. 601. № 12. P. 2473.
89. *Dubbioso R., Manganelli F., Siebner H.R., Di Lazzaro V.* Fast Intracortical Sensory-Motor Integration: A Window Into the Pathophysiology of Parkinson's Disease // *Front. Hum. Neurosci.* 2019. V. 13. P. 111.
90. *Northoff G., Hirjak D., Wolf R.C. et al.* All roads lead to the motor cortex: psychomotor mechanisms and their biochemical modulation in psychiatric disorders // *Mol. Psychiatry.* 2021. V. 26. № 1. P. 92.
91. *Compean E., Hamner M.* Posttraumatic stress disorder with secondary psychotic features (PTSD-SP): Diagnostic and treatment challenges // *Prog. Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry.* 2019. V. 88. P. 265.
92. *Zakharov A.V., Poverennova I.E., Kalinin V.A., Khivintseva E.V.* Parasomnias associated with disordered arousal from slow-wave sleep: mechanism of occurrence and neurophysiological characteristics // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2020. V. 50. № 3. P. 270.
93. *Gieselmann A., Ait Aoudia M., Carr M. et al.* Aetiology and treatment of nightmare disorder: State of the art and future perspectives // *J. Sleep Res.* 2019. V. 28. № 4. P. e12820.
94. *Engel-Yeger B., Palgy-Levin D., Lev-Wiesel R.* The sensory profile of people with post-traumatic stress symptoms // *Occup. Ther. Mental Health.* 2013. V. 29. № 3. P. 266.
95. *Shochat T., Tzischinsky O., Engel-Yeger B.* Sensory hypersensitivity as a contributing factor in the relation between sleep and behavioral disorders in normal schoolchildren // *Behav. Sleep Med.* 2009. V. 7. № 1. P. 53.
96. *Engel-Yeger B., Dunn W.* The Relationship between sensory processing difficulties and anxiety level of healthy adults // *Br. J. Occup. Ther.* 2011. V. 74. № 5. P. 210.

97. Adenauer H., Pinösch S., Catani C. et al. Early processing of threat cues in posttraumatic stress disorder-evidence for a cortical vigilance-avoidance reaction // *Biol. Psychiatry*. 2010. V. 68. № 5. P. 451.
98. Ge Y., Wu J., Sun X., Zhang K. Enhanced mismatch negativity in adolescents with posttraumatic stress disorder (PTSD) // *Int. J. Psychophysiol.* 2011. V. 79. № 2. P. 231.
99. Harricharan S., Nicholson A.A., Densmore M. et al. Sensory overload and imbalance: Resting-state vestibular connectivity in PTSD and its dissociative subtype // *Neuropsychologia*. 2017. V. 106. P. 169.
100. Clancy K., Ding M., Bernat E. et al. Restless "rest": intrinsic sensory hyperactivity and disinhibition in post-traumatic stress disorder // *Brain*. 2017. V. 140. № 7. P. 2041.
101. Blechert J., Michael T., Grossman P. et al. Autonomic and respiratory characteristics of posttraumatic stress disorder and panic disorder // *Psychosom. Med.* 2007. V. 69. № 9. P. 935.
102. Pole N. The psychophysiology of posttraumatic stress disorder: a meta-analysis // *Psychol. Bull.* 2007. V. 133. № 5. P. 725.
103. Streeter C.C., Gerbarg P.L., Saper R.B. et al. Effects of yoga on the autonomic nervous system, gamma-aminobutyric-acid, and allostasis in epilepsy, depression, and post-traumatic stress disorder // *Med. Hypotheses*. 2012. V. 78. № 5. P. 571.
104. Campbell A.A., Wisco B.E., Silvia P.J., Gay N. Resting respiratory sinus arrhythmia and posttraumatic stress disorder: A meta-analysis // *Biol. Psychol.* 2019. V. 144. P. 125.
105. Cohen H., Kotler M., Matar M.A. et al. Analysis of heart rate variability in posttraumatic stress disorder patients in response to a trauma-related reminder // *Biol. Psychiatry*. 1998. V. 44. № 10. P. 1054.
106. Wilhelm F.H., Grossman P., Coyle M.A. Improving estimation of cardiac vagal tone during spontaneous breathing using a paced breathing calibration // *Biomed. Sci. Instrum.* 2004. V. 40. P. 317.
107. Tolin D.F., Billingsley A.L., Hallion L.S., Diefenbach G.J. Low pre-treatment end-tidal CO₂ predicts dropout from cognitive-behavioral therapy for anxiety and related disorders // *Behav. Res. Ther.* 2017. V. 90. P. 32.
108. Gazi A.H., Wittbrodt M.T., Harrison A.B. et al. Robust estimation of respiratory variability uncovers correlates of limbic brain activity and transcutaneous cervical vagus nerve stimulation in the context of traumatic stress // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2022. V. 69. № 2. P. 849.
109. Karl A., Malta L.S., Maercker A. Meta-analytic review of event-related potential studies in post-traumatic stress disorder // *Biol. Psychol.* 2006. V. 71. № 2. P. 123.
110. Javanbakht A., Liberzon I., Amirsadri A. et al. Event-related potential studies of post-traumatic stress disorder: a critical review and synthesis // *Biol. Mood Anxiety Disord.* 2011. V. 1. № 1. P. 5.
111. Holstein D.H., Vollenweider F.X., Jäncke L. et al. P50 suppression, prepulse inhibition, and startle reactivity in the same patient cohort suffering from posttraumatic stress disorder // *J. Affect. Disord.* 2010. V. 126. № 1–2. P. 188.
112. Gjini K., Boutros N.N., Haddad L. et al. Evoked potential correlates of post-traumatic stress disorder in refugees with history of exposure to torture // *J. Psychiatr. Res.* 2013. V. 47. № 10. P. 1492.
113. Fan J., Xu P., Van Dam N.T. et al. Spontaneous brain activity relates to autonomic arousal // *J. Neurosci.* 2012. V. 32. № 33. P. 11176.
114. Jokić-Begić N., Begić D. Quantitative electroencephalogram (qEEG) in combat veterans with post-traumatic stress disorder (PTSD) // *Nord. J. Psychiatry*. 2003. V. 57. № 5. P. 351.
115. Falconer E., Bryant R., Felmingham K.L. et al. The neural networks of inhibitory control in posttraumatic stress disorder // *J. Psychiatry Neurosci.* 2008. V. 33. № 5. P. 413.
116. Yoon T., Keller M.L., De-Lap B.S. et al. Sex differences in response to cognitive stress during a fatiguing contraction // *J. Appl. Physiol.* 2009. V. 107. № 5. P. 1486.
117. Southwick S.M., Paige S., Morgan C.A. et al. Neurotransmitter alterations in PTSD: catecholamines and serotonin // *Semin. Clin. Neuropsychiatry*. 1999. V. 4. № 4. P. 242.
118. Tanev K.S., Orr S.P., Pace-Schott E.F. et al. Positive association between nightmares and heart rate response to loud tones: relationship to parasympathetic dysfunction in PTSD nightmares // *J. Nerv. Ment. Dis.* 2017. V. 205. № 4. P. 308.
119. Mäder T., Oliver K.I., Daffre C. et al. Autonomic activity, posttraumatic and nontraumatic nightmares, and PTSD after trauma exposure // *Psychol. Med.* 2023. V. 53. № 3. P. 731.
120. Carlson J.G., Chemtob C.M., Hedlund N.L. et al. Characteristics of veterans in Hawaii with and without diagnoses of post-traumatic stress disorder // *Hawaii Med. J.* 1994. V. 53. № 11. P. 314.
121. Carlson J.G., Singelis T.M., Chemtob C.M. Facial EMG responses to combat-related visual stimuli in veterans with and without posttraumatic stress disorder // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*. 1997. V. 22. № 4. P. 247.
122. Mierau A., Hülsdünker T., Strüder H.K. Changes in cortical activity associated with adaptive behavior during repeated balance perturbation of unpredictable timing // *Front. Behav. Neurosci.* 2015. V. 9. P. 272.
123. Kandel E.R., Schwartz J.H., Jessell T.M. et al. Principles of Neural Science, Fifth Edition. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education/Medical, 2012. 1760 p.
124. Сафонов В.К., Абабков В.А., Веревошкин С.В. и др. Биологические и психологические детерминанты реагирования на ситуации социального стресса // *Психология. Психофизиология*. 2013. Т. 6. № 3. С. 82.

125. *Volchan E., Rocha-Rego V., Bastos A.F. et al.* Immobility reactions under threat: A contribution to human defensive cascade and PTSD // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2017. V. 76. Pt. A. P. 29.
126. *Aron C.M., Harvey S., Hainline B. et al.* Post-traumatic stress disorder (PTSD) and other trauma-related mental disorders in elite athletes: a narrative review // *Br. J. Sports Med.* 2019. V. 53. № 12. P. 779.
127. *Зонов А.А., Насырова Е.Г., Леонтьев Е.А.* Изменения психофизиологических показателей после тренинга с использованием нейробиоуправления у лиц, перенесших COVID-19 // *Acta Med. Eurasica.* 2022. № 2. С. 1.
128. *Klimesch W., Sauseng P., Gerloff C.* Enhancing cognitive performance with repetitive transcranial magnetic stimulation at human individual alpha frequency // *Eur. J. Neurosci.* 2003. V. 17. № 5. P. 1129.
129. *Князев Г.Г., Бочаров А.В., Митрофанова Л.Г. и др.* ЭЭГ-корреляты агрессивности и тревожности в модели социальных взаимодействий // *Ж. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова.* 2011. Т. 61. № 6. С. 716.
130. *Curatolo M., Arendt-Nielsen L.* Central hypersensitivity in chronic musculoskeletal pain // *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.* 2015. V. 26. № 2. P. 175.
- (Post-Traumatic Stress Disorder in the Paradigm of Evidence-Based Medicine: Pathogenesis, Clinical Picture, Diagnosis and Therapy: Methodological Recommendations), St. Petersburg: Natsional'nyi Meditsinskii Issledovatel'skii Tsentr Psikhiiatrii i Nevrologii Im. V.M. Bekhtereva, 2022. 33 p.
9. *Benjet C., Bromet E., Karam E.G. et al.* The epidemiology of traumatic event exposure worldwide: results from the World Mental Health Survey Consortium // *Psychol. Med.* 2016. V. 46. № 2. P. 327.
10. *Schnurr P.P.* The changing face of PTSD diagnosis // *J. Trauma. Stress.* 2009. V. 22. № 1. P. 1.
11. *Tanielian T., Jaycox L.H.* Invisible Wounds of War: Psychological and Cognitive Injuries, Their Consequences, and Services to Assist Recovery. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2008. 424 p.
12. *Bradley R., Greene J., Russ E. et al.* A multidimensional meta-analysis of psychotherapy for PTSD // *Am. J. Psychiatry.* 2005. V. 162. № 2. P. 214.
13. *Stein D.J., Ipser J.C., Seedat S.* Pharmacotherapy for post traumatic stress disorder (PTSD) // *Cochrane Database Syst. Rev.* 2006. V. 2006. № 1. P. CD002795.
14. *Krystal J.H., Davis L.L., Neylan T.C. et al.* It is time to address the crisis in the pharmacotherapy of posttraumatic stress disorder: a consensus statement of the PTSD Psychopharmacology Working Group // *Biol. Psychiatry.* 2017. V. 82. № 7. P. e51.
15. *Nicholson A.A., Harricharan S., Densmore M. et al.* Classifying heterogeneous presentations of PTSD via the default mode, central executive, and salience networks with machine learning // *NeuroImage. Clin.* 2020. V. 27. P. 102262.
16. *Lanius R.A., Frewen P.A., Tursich M. et al.* Restoring large-scale brain networks in PTSD and related disorders: a proposal for neuroscientifically-informed treatment interventions // *Eur. J. Psychotraumatol.* 2015. V. 6. P. 27313.
17. *Etkin A., Maron-Katz A., Wu W. et al.* Using fMRI connectivity to define a treatment-resistant form of post-traumatic stress disorder // *Sci. Transl. Med.* 2019. V. 11. № 486. P. eaa13236.
18. *Shtark M.B.* Notes on biofeedback (today and a little about tomorrow), [Bioupravlenie-3: teoriya i praktika] (Biofeedback-3: Theory and Practice). Novosibirsk: Inst. Mol. Biol. Kletki, 1998. P. 5.
19. *Ros T., Enriquez-Geppert S., Zotev V. et al.* Consensus on the reporting and experimental design of clinical and cognitive-behavioural neurofeedback studies (CRED-nf checklist) // *Brain.* 2020. V. 143. № 6. P. 1674.
20. *Belinskaia A., Smetanin N., Lebedev M., Ossadtchi A.* Short-delay neurofeedback facilitates training of the parietal alpha rhythm // *J. Neural. Eng.* 2020. V. 17. № 6. doi: 10.1088/1741-2552/abc8d7
21. *Ogden P., Pain C., Fisher J.* A sensorimotor approach to the treatment of trauma and dissociation // *Psychiatr. Clin. North Am.* 2006. V. 29. № 1. P. 263.

REFERENCES

22. *Napalkov D.A., Ratmanova P.O., Salykhova R.N., Kolikoff M.B.* Electroencephalographic markers of optimal performance in marksmen // *Bull. Siber. Med.* 2013. V. 12. № 2. P. 219.
23. *Babiloni C., Infarinato F., Marzano N. et al.* Intra-hemispheric functional coupling of alpha rhythms is related to golfer's performance: a coherence EEG study // *Int. J. Psychophysiol.* 2011. V. 82. № 3. P. 260.
24. *Bazanova O.M., Mernaya E.M., Shtark M.B.* Biofeedback in psychomotor training: electrophysiological basis // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2009. V. 39. № 5. P. 437.
25. *Petrenko T.I., Bazanova O.M., Kabardov M.K.* Prospects for using biofeedback to train performing musicians // *Vestn. Ross. Univ. Druzhby Nar. Ser. Psikholog. Pedagog.* 2019. V. 16. № 4. P. 495.
26. *Brown P., RELISH Consortium, Zhou Y.* Large expert-curated database for benchmarking document similarity detection in biomedical literature search // *Database.* 2019. V. 2019. P. baz085.
27. *Anokhin P.K.* The role of systemic aspect in the development of boundary problems of neurophysiology and psychology // *Biomashsistemy.* 2018. V. 2. № 4. P. 22.
28. *Tecchio F., Bertoli M., Gianni E. et al.* To be is to become. fractal neurodynamics of the body-brain control system // *Front. Physiol.* 2020. V. 11. P. 609768.
29. *Sporns O., Edelman G.M.* Solving Bernstein's problem: a proposal for the development of coordinated movement by selection // *Child Dev.* 1993. V. 64. № 4. P. 960.
30. *Friston K., Kiebel S.* Predictive coding under the free-energy principle // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2009. V. 364. № 1521. P. 1211.
31. *Javadi A.-H., Beyko A., Walsh V., Kanai R.* Transcranial direct current stimulation of the motor cortex biases action choice in a perceptual decision task // *J. Cogn. Neurosci.* 2015. V. 27. № 11. P. 2174.
32. *Abramenkova V.V., Avanesov V.S., Agamova N.S. et al.* [Psikhologiya: slovar'] (Psychology: Dictionary). Eds. Petrovskii A.V., Yaroshevskii M.G. Moscow: Politizdat, 1990. 494 p.
33. *Lapenta O.M., Keller P.E., Nozaradan S., Varlet M.* Spatial and temporal (non)binding of audiovisual rhythms in sensorimotor synchronisation // *Exp. Brain Res.* 2023. V. 241. № 3. P. 875.
34. *Hayes S.C., Luoma J.B., Bond F.W. et al.* Acceptance and commitment therapy: model, processes and outcomes // *Behav. Res. Ther.* 2006. V. 44. № 1. P. 1.
35. *Kashdan T.B., Barrios V., Forsyth J.P., Steger M.F.* Experiential avoidance as a generalized psychological vulnerability: comparisons with coping and emotion regulation strategies // *Behav. Res. Ther.* 2006. V. 44. № 9. P. 1301.
36. *Connor K.M., Davidson J.R.T.* Development of a new resilience scale: the Connor-Davidson resilience scale (CD-RISC) // *Depress. Anxiety.* 2003. V. 18. № 2. P. 76.
37. *Tugade M.M., Fredrickson B.L.* Resilient individuals use positive emotions to bounce back from negative emotional experiences // *J. Pers. Soc. Psychol.* 2004. V. 86. № 2. P. 320.
38. *Rutter M.* Resilience, competence, and coping // *Child Abuse Negl.* 2007. V. 31. № 3. P. 205.
39. *Grad F.P.* The preamble of the Constitution of the World Health Organization // *Bull. World Health Organ.* 2002. V. 80. № 12. P. 981.
40. *Karim S., Chahal A., Khanji M.Y. et al.* Autonomic cardiovascular control in health and disease // *Compr. Physiol.* 2023. V. 13. № 2. P. 4493.
41. *Brown R.P., Gerbarg P.L.* Yoga breathing, meditation, and longevity // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2009. V. 1172. P. 54.
42. *Brown R.P., Gerbarg P.L., Muench F.* Breathing practices for treatment of psychiatric and stress-related medical conditions // *Psychiatr. Clin. North Am.* 2013. V. 36. № 1. P. 121.
43. *Lehrer P.M., Gevirtz R.* Heart rate variability biofeedback: how and why does it work? // *Front. Psychol.* 2014. V. 5. P. 756.
44. *Wallace T., Morris J.T., Glickstein R. et al.* Implementation of a mobile technology-supported diaphragmatic breathing intervention in military mTBI with PTSD // *J. Head Trauma Rehabil.* 2022. V. 37. № 3. P. 152.
45. *Telles M.P.D.C., Diniz-Filho J.A.F., Bastos R.P. et al.* Landscape genetics of *Physalaemus cuvieri* in Brazilian Cerrado: Correspondence between population structure and patterns of human occupation and habitat loss // *Biol. Conserv.* 2007. V. 139. № 1–2. P. 37.
46. *Röttger A., Röttger S., Grossi C. et al.* New metrology for radon at the environmental level // *Meas. Sci. Technology.* 2021. V. 32. № 12. P. 124008.
47. *Siedlecki P., Ivanova T.D., Shoemaker J.K., Garland S.J.* The effects of slow breathing on postural muscles during standing perturbations in young adults // *Exp. Brain Res.* 2022. V. 240. № 10. P. 2623.
48. *Fumoto M., Sato-Suzuki I., Seki Y. et al.* Appearance of high-frequency alpha band with disappearance of low-frequency alpha band in EEG is produced during voluntary abdominal breathing in an eyes-closed condition // *Neurosci. Res.* 2004. V. 50. № 3. P. 307.
49. *Uryumtsev D.Y., Gulyaeva V.V., Zinchenko M.I. et al.* Effect of acute hypoxia on cardiorespiratory coherence in male runners // *Front. Physiol.* 2020. V. 11. P. 630.
50. *Tseilikman V.E., Tseilikman O.B., Feklicheva I.V. et al.* Psychological, neurobiological and neuroendocrinological characteristics of post-traumatic stress disorder syndrome // *Psikholog. Psikhofiziol.* 2018. V. 11. № 4. P. 73.
51. *Bazanova O.M., Vernon D.* Interpreting EEG alpha activity // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2014. V. 44. P. 94.

52. *Livanov M.N.* [Prostranstvennaya organizatsiya protsessov golovnoy mozga] (Spatial Organization of Cerebral Processes). Moscow: Nauka, 1972. 182 p.
53. *Podvalny E., Noy N., Harel M. et al.* A unifying principle underlying the extracellular field potential spectral responses in the human cortex // *J. Neurophysiol.* 2015. V. 114. № 1. P. 505.
54. *Jensen O., Mazaheri A.* Shaping functional architecture by oscillatory alpha activity: gating by inhibition // *Front. Hum. Neurosci.* 2010. V. 4. P. 186.
55. *Haegens S., Nácher V., Luna R. et al.* α -Oscillations in the monkey sensorimotor network influence discrimination performance by rhythmical inhibition of neuronal spiking // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2011. V. 108. № 48. P. 19377.
56. *Babiloni C., Marzano N., Iacoboni M. et al.* Resting state cortical rhythms in athletes: a high-resolution EEG study // *Brain Res. Bull.* 2010. V. 81. № 1. P. 149.
57. *Del Percio C., Babiloni C., Marzano N. et al.* "Neural efficiency" of athletes' brain for upright standing: a high-resolution EEG study // *Brain Res. Bull.* 2009. V. 79. № 3–4. P. 193.
58. *Jann K., Dierks T., Boesch C. et al.* BOLD correlates of EEG alpha phase-locking and the fMRI default mode network // *Neuroimage.* 2009. V. 45. № 3. P. 903.
59. *Sadaghiani S., Scheeringa R., Lehongre K. et al.* Intrinsic connectivity networks, alpha oscillations, and tonic alertness: a simultaneous electroencephalography/functional magnetic resonance imaging study // *J. Neurosci.* 2010. V. 30. № 30. P. 10243.
60. *Beissner F., Meissner K., Bär K.-J., Napadow V.* The autonomic brain: an activation likelihood estimation meta-analysis for central processing of autonomic function // *J. Neurosci.* 2013. V. 33. № 25. P. 10503.
61. *Weber S., Aleman A., Hugdahl K.* Involvement of the default mode network under varying levels of cognitive effort // *Sci. Rep.* 2022. V. 12. № 1. P. 6303.
62. *Klimesch W.* EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis // *Brain Res. Brain Res. Rev.* 1999. V. 29. № 2–3. P. 169.
63. *Cheung V.C.K., Turolla A., Agostini M. et al.* Muscle synergy patterns as physiological markers of motor cortical damage // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2012. V. 109. № 36. P. 14652.
64. *d'Avella A., Bizzi E.* Shared and specific muscle synergies in natural motor behaviors // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2005. V. 102. № 8. P. 3076.
65. *Popov G.I.* [Upravlenie formirovaniem i sovershenstvovaniem dvigatel'nykh deistvii sportsmenov] (Management of the Formation and Improvement of Motor Actions in Athletes). Moscow: Triumph, 2022. 400 p.
66. *Talalai B.N.* [Formation of performing (motor-technical) skills while learning to play musical instruments]. Extended abstract of cand. sci. dissertation, Moscow, 1982. 235 p.
67. *Voerman G.E., Sandsjö L., Vollenbroek-Hutten M.M.R. et al.* The influence of different intermittent myofeedback training schedules on learning relaxation of the trapezius muscle while performing a gross-motor task // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2004. V. 93. № 1–2. P. 57.
68. *Malmö R.B., Malmö H.P.* On electromyographic (EMG) gradients and movement-related brain activity: significance for motor control, cognitive functions, and certain psychopathologies // *Int. J. Psychophysiol.* 2000. V. 38. № 2. P. 145.
69. *Yilmaz G., Ungan P., Türker K.S.* EEG-like signals can be synthesized from surface representations of single motor units of facial muscles // *Exp. Brain Res.* 2018. V. 236. № 4. P. 1007.
70. *Cacioppo J., Bush L., Tassinary L.* Microexpressive facial actions as a function of affective stimuli: replication and extension // *Pers. Soc. Psychol. Bull.* 1992. V. 18. P. 515.
71. *Wijnsman J., Grundlehner B., Liu H. et al.* Towards mental stress detection using wearable physiological sensors // *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2011. V. 2011. P. 1798.
72. *Wright W.G., Handy J.D., Haskell A. et al.* History of mild traumatic brain injury affects static balance under complex multisensory manipulations // *J. Neurotrauma.* 2022. V. 39. № 11–12. P. 821.
73. *Meehan A., Lewandowski A., Weaver L.K. et al.* Prospective study of anxiety, post-traumatic stress and depression on postural control, gait, otolith and visuospatial function in military service members with persistent post-concussive symptoms // *Undersea Hyperb. Med.* 2019. V. 46. № 3. P. 271.
74. *Ward C.V.* Interpreting the posture and locomotion of *Australopithecus afarensis*: where do we stand? // *Am. J. Phys. Anthropol.* 2002. Suppl 35. P. 185.
75. *Gurfinkel' V.S., Kots Ya.M., Shik M.L.* [Regulyatsiya pozy cheloveka] (Human Posture Control). Moscow: Nauka, 1965. 256 p.
76. *Bazanov O.M., Kovaleva A.V.* Psychophysiological indicators of postural control. contribution of the Russian scientific school. Part I // *Human Physiology.* 2022. V. 48. № 2. P. 207.
77. *Sibley K.M., Howe T., Lamb S.E. et al.* Recommendations for a core outcome set for measuring standing balance in adult populations: a consensus-based approach // *PLoS One.* 2015. V. 10. № 3. P. e0120568.
78. *Leow L.-A., Rinchon C., Grahn J.* Familiarity with music increases walking speed in rhythmic auditory cuing // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2015. V. 1337. P. 53.
79. *Aftanas L.I., Bazanova O.M., Novozhilova N.V.* Posture-motor and posture-ideomotor dual-tasking: A putative marker of psychomotor retardation and depressive rumination in patients with major depressive disorder // *Front. Hum. Neurosci.* 2018. V. 12. P. 108.
80. *Leman M., Moelants D., Varewyck M. et al.* Activating and relaxing music entrains the speed of beat

- synchronized walking // PLoS One. 2013. V. 8. № 7. P. e67932.
81. Bazanova O.M., Kholodina N.V., Nikolenko E.D. et al. Training of support afferentation in postmenopausal women // Int. J. Psychophysiol. 2017. V. 122. P. 65.
 82. Chemin B., Mouraux A., Nozaradan S. Body movement selectively shapes the neural representation of musical rhythms // Psychol. Sci. 2014. V. 25. № 12. P. 2147.
 83. Andreeva A., Melnikov A., Skvortsov D. et al. Postural stability in athletes: The role of sport direction // Gait Posture. 2021. V. 89. P. 120.
 84. Negahban H., Aryan N., Mazaheri M. et al. Effect of expertise in shooting and Taekwondo on bipedal and unipedal postural control isolated or concurrent with a reaction-time task // Gait Posture. 2013. V. 38. № 2. P. 226.
 85. Ouchi Y., Okada H., Yoshikawa E. et al. Brain activation during maintenance of standing postures in humans // Brain. 1999. V. 122 (Pt. 2). P. 329.
 86. Papegaaij S., Taube W., Baudry S. et al. Aging causes a reorganization of cortical and spinal control of posture // Front. Aging Neurosci. 2014. V. 6. P. 28.
 87. Meir-Hasson Y., Kinreich S., Podlipsky I. et al. An EEG finger-print of fMRI deep regional activation // Neuroimage. 2014. V. 102. Pt. 1. P. 128.
 88. Zaback M., Missen K.J., Adkin A.L. et al. Cortical potentials time-locked to discrete postural events during quiet standing are facilitated during postural threat exposure // J. Physiol. 2023. V. 601. № 12. P. 2473.
 89. Dubbioso R., Manganelli F., Siebner H.R., Di Lazzaro V. Fast intracortical sensory-motor integration: a window into the pathophysiology of Parkinson's disease // Front. Hum. Neurosci. 2019. V. 13. P. 111.
 90. Northoff G., Hirjak D., Wolf R.C. et al. All roads lead to the motor cortex: psychomotor mechanisms and their biochemical modulation in psychiatric disorders // Mol. Psychiatry. 2021. V. 26. № 1. P. 92.
 91. Compean E., Hamner M. Posttraumatic stress disorder with secondary psychotic features (PTSD-SP): Diagnostic and treatment challenges // Prog. Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry. 2019. V. 88. P. 265.
 92. Zakharov A.V., Poverennova I.E., Kalinin V.A., Khivintseva E.V. Parasomnias associated with disordered arousal from slow-wave sleep: mechanism of occurrence and neurophysiological characteristics // Neurosci. Behav. Physiol. 2020. V. 50. № 3. P. 270.
 93. Gieselmann A., Ait Aoudia M., Carr M. et al. Aetiology and treatment of nightmare disorder: State of the art and future perspectives // J. Sleep Res. 2019. V. 28. № 4. P. e12820.
 94. Engel-Yeger B., Palgy-Levin D., Lev-Wiesel R. The sensory profile of people with post-traumatic stress symptoms // Occup. Ther. Mental Health. 2013. V. 29. № 3. P. 266.
 95. Shochat T., Tzischinsky O., Engel-Yeger B. Sensory hypersensitivity as a contributing factor in the relation between sleep and behavioral disorders in normal schoolchildren // Behav. Sleep Med. 2009. V. 7. № 1. P. 53.
 96. Engel-Yeger B., Dunn W. The relationship between sensory processing difficulties and anxiety level of healthy adults // Br. J. Occup. Ther. 2011. V. 74. № 5. P. 210.
 97. Adenauer H., Pinösch S., Catani C. et al. Early processing of threat cues in posttraumatic stress disorder-evidence for a cortical vigilance-avoidance reaction // Biol. Psychiatry. 2010. V. 68. № 5. P. 451.
 98. Ge Y., Wu J., Sun X., Zhang K. Enhanced mismatch negativity in adolescents with posttraumatic stress disorder (PTSD) // Int. J. Psychophysiol. 2011. V. 79. № 2. P. 231.
 99. Haricharan S., Nicholson A.A., Densmore M. et al. Sensory overload and imbalance: Resting-state vestibular connectivity in PTSD and its dissociative subtype // Neuropsychologia. 2017. V. 106. P. 169.
 100. Clancy K., Ding M., Bernat E. et al. Restless "rest": intrinsic sensory hyperactivity and disinhibition in post-traumatic stress disorder // Brain. 2017. V. 140. № 7. P. 2041.
 101. Blechert J., Michael T., Grossman P. et al. Autonomic and respiratory characteristics of posttraumatic stress disorder and panic disorder // Psychosom. Med. 2007. V. 69. № 9. P. 935.
 102. Pole N. The psychophysiology of posttraumatic stress disorder: a meta-analysis // Psychol. Bull. 2007. V. 133. № 5. P. 725.
 103. Streeter C.C., Gerbarg P.L., Saper R.B. et al. Effects of yoga on the autonomic nervous system, gamma-aminobutyric-acid, and allostasis in epilepsy, depression, and post-traumatic stress disorder // Med. Hypotheses. 2012. V. 78. № 5. P. 571.
 104. Campbell A.A., Wisco B.E., Silvia P.J., Gay N. Resting respiratory sinus arrhythmia and posttraumatic stress disorder: A meta-analysis // Biol. Psychol. 2019. V. 144. P. 125.
 105. Cohen H., Kotler M., Matar M.A. et al. Analysis of heart rate variability in posttraumatic stress disorder patients in response to a trauma-related reminder // Biol. Psychiatry. 1998. V. 44. № 10. P. 1054.
 106. Wilhelm F.H., Grossman P., Coyle M.A. Improving estimation of cardiac vagal tone during spontaneous breathing using a paced breathing calibration // Biomed. Sci. Instrum. 2004. V. 40. P. 317.
 107. Tolin D.F., Billingsley A.L., Hallion L.S., Diefenbach G.J. Low pre-treatment end-tidal CO₂ predicts dropout from cognitive-behavioral therapy for anxiety and related disorders // Behav. Res. Ther. 2017. V. 90. P. 32.
 108. Gazi A.H., Wittbrodt M.T., Harrison A.B. et al. Robust estimation of respiratory variability uncovers correlates of limbic brain activity and transcutaneous cervical vagus nerve stimulation in the context of traumatic stress // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2022. V. 69. № 2. P. 849.

109. *Karl A., Malta L.S., Maercker A.* Meta-analytic review of event-related potential studies in post-traumatic stress disorder // *Biol. Psychol.* 2006. V. 71. № 2. P. 123.
110. *Javanbakht A., Liberzon I., Amirsadri A. et al.* Event-related potential studies of post-traumatic stress disorder: a critical review and synthesis // *Biol. Mood Anxiety Disord.* 2011. V. 1. № 1. P. 5.
111. *Holstein D.H., Vollenweider F.X., Jäncke L. et al.* P50 suppression, prepulse inhibition, and startle reactivity in the same patient cohort suffering from posttraumatic stress disorder // *J. Affect. Disord.* 2010. V. 126. № 1–2. P. 188.
112. *Gjini K., Boutros N.N., Haddad L. et al.* Evoked potential correlates of post-traumatic stress disorder in refugees with history of exposure to torture // *J. Psychiatr. Res.* 2013. V. 47. № 10. P. 1492.
113. *Fan J., Xu P., Van Dam N.T. et al.* Spontaneous brain activity relates to autonomic arousal // *J. Neurosci.* 2012. V. 32. № 33. P. 11176.
114. *Jokić-Begić N., Begić D.* Quantitative electroencephalogram (qEEG) in combat veterans with post-traumatic stress disorder (PTSD) // *Nord. J. Psychiatry.* 2003. V. 57. № 5. P. 351.
115. *Falconer E., Bryant R., Felmingham K.L. et al.* The neural networks of inhibitory control in posttraumatic stress disorder // *J. Psychiatry Neurosci.* 2008. V. 33. № 5. P. 413.
116. *Yoon T., Keller M.L., De-Lap B.S. et al.* Sex differences in response to cognitive stress during a fatiguing contraction // *J. Appl. Physiol.* 2009. V. 107. № 5. P. 1486.
117. *Southwick S.M., Paige S., Morgan C.A. et al.* Neurotransmitter alterations in PTSD: catecholamines and serotonin // *Semin. Clin. Neuropsychiatry.* 1999. V. 4. № 4. P. 242.
118. *Tanev K.S., Orr S.P., Pace-Schott E.F. et al.* Positive association between nightmares and heart rate response to loud tones: relationship to parasympathetic dysfunction in PTSD nightmares // *J. Nerv. Ment. Dis.* 2017. V. 205. № 4. P. 308.
119. *Mäder T., Oliver K.I., Daffre C. et al.* Autonomic activity, posttraumatic and nontraumatic nightmares, and PTSD after trauma exposure // *Psychol. Med.* 2023. V. 53. № 3. P. 731.
120. *Carlson J.G., Chemtob C.M., Hedlund N.L. et al.* Characteristics of veterans in Hawaii with and without diagnoses of post-traumatic stress disorder // *Hawaii Med. J.* 1994. V. 53. № 11. P. 314.
121. *Carlson J.G., Singelis T.M., Chemtob C.M.* Facial EMG responses to combat-related visual stimuli in veterans with and without posttraumatic stress disorder // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback.* 1997. V. 22. № 4. P. 247.
122. *Mierau A., Hülzdünker T., Strüder H.K.* Changes in cortical activity associated with adaptive behavior during repeated balance perturbation of unpredictable timing // *Front. Behav. Neurosci.* 2015. V. 9. P. 272.
123. *Kandel E.R., Schwartz J.H., Jessell T.M. et al.* Principles of Neural Science, Fifth Edition. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education/Medical, 2012. 1760 p.
124. *Safonov V.K., Ababkov V.A., Verevochkin S.V. et al.* Biological and psychological determinants in response to social stress // *Psikhol. Psikhofiziol.* 2013. V. 6. № 3. P. 82.
125. *Volchan E., Rocha-Rego V., Bastos A.F. et al.* Immobility reactions under threat: A contribution to human defensive cascade and PTSD // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2017. V. 76. Pt. A. P. 29.
126. *Aron C.M., Harvey S., Hainline B. et al.* Post-traumatic stress disorder (PTSD) and other trauma-related mental disorders in elite athletes: a narrative review // *Br. J. Sports Med.* 2019. V. 53. № 12. P. 779.
127. *Zonov A.A., Nasyrova E.G., Leontiev E.A.* Changes in psycho-physiological indicators after training with the use of neuro-biofeedback in people who survived the COVID-19 // *Acta Med. Eurasica.* 2022. № 2. P. 1.
128. *Klimesch W., Sauseng P., Gerloff C.* Enhancing cognitive performance with repetitive transcranial magnetic stimulation at human individual alpha frequency // *Eur. J. Neurosci.* 2003. V. 17. № 5. P. 1129.
129. *Kniazev G.G., Bocharov A.V., Mitrofanova L.G. et al.* [EEG correlates of aggression and anxiety in a social interaction model] // *Zh. Vyssh. Nerv. Deiat. Im. I.P. Pavlova.* 2011. V. 61 № 6. P. 716.
130. *Curatolo M., Arendt-Nielsen L.* Central hypersensitivity in chronic musculoskeletal pain // *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.* 2015. V. 26. № 2. P. 175.

Study of Psychophysiological Indicators of Sensorimotor Integration in PTSD. Justification of the Choice of Targets for Biofeedback

**O. M. Bazanova^{a, b, *}, N. V. Balioz^c, S. A. Ermolaeva^d, A. V. Zakharov^e, A. A. Zonov^f,
I. V. Larkova^g, T. A. Mariyanovska^h, A. A. Melnikovⁱ, E. D. Nikolenko^a, E. P. Plotnikova^j,
P. D. Rudych^h, I. V. Shirolapov^e**

^a*Institute of Molecular Biology and Biophysics, Novosibirsk, Russia*

^b*Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow region, Dolgoprudny, Russia*

^c*State Research Institute of Neurosciences and Medicine, Novosibirsk, Russia*

^d*Saint-Petersburg Institute of Oriental Methods of Rehabilitation, St. Petersburg, Russia*

^e*Samara State Medical University, Samara, Russia*

^f*LLC "Neurobotics", Zelenograd, Russia*

^g*Lugansk Republican Center for Emergency Medical Care and Medicine of the Catastrophes, Lugansk, LPR, Russia*

^h*Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia*

ⁱ*Russian University Sport "SCOLIPE", Moscow, Russia*

^j*Lugansk State Medical University, Lugansk, LPR, Russia*

**E-mail: bazanova_olgami@mail.ru*

Post-traumatic stress disorder (PTSD) is an actual medico-social problem. The pathogenesis of PTSD closely relates to impairment of sensorimotor integration (SMI). The effectiveness of psychosomatic disorder therapy for PTSD rehabilitation can be improved by restoring normal sensorimotor integration. The review examines various autonomic, electro-physiological and postural markers of high sensory motor integration in highly skilled athletes and musicians, as well as impairment of these indices in persons with PTSD. We have established that the most accessible and informative indicators of SMI are: an increase in EEG power in the individually adjusted high-frequency alpha-band, a reduction in energy demands for posture control and a decrease in the electromyographic activity of redundant muscles, not involved in motor-cognitive dual task. In the future, it is planned to use these indicators to diagnose stress disorders and to develop sensorimotor integration recovery training in patients with PTSD.

Keywords: sensorimotor control, coordination, post-traumatic stress disorder, biofeedback, cognitive functions, emotions, stress, autonomic functions, electroencephalography, electromyography, stabilography.