

**Федеральное медико-биологическое агентство
(ФМБА России)**

**ИНДИВИДУАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВИЗУАЛИЗАЦИИ И МОДУЛЯЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ
ГОЛОВНОГО МОЗГА У СПОРТСМЕНОВ СПОРТИВНЫХ СБОРНЫХ
КОМАНД РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ВИДА
СПОРТА, СПОРТИВНОЙ КВАЛИФИКАЦИИ И ПОЛОВОЗРАСТНЫХ
ОСОБЕННОСТЕЙ**

Методические рекомендации

МР ФМБА России 91500.12.0012 - 2024

Издание официальное

Москва

2024

Предисловие

1. Разработаны:

1.1. В Федеральном государственном бюджетном учреждении «Федеральный научно-клинический центр спортивной медицины и реабилитации Федерального медико-биологического агентства» (ФГБУ ФНКЦСМ ФМБА России):

Директор – канд. мед. наук. Жолинский А.В.

Заместитель директора по научной работе – д-р. мед. наук, профессор Парастаев С.А.

Начальник организационно-исследовательского отдела – канд. мед. наук, Фещенко В.С.

1.2. В Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой Российской академии наук» (ИМЧ РАН):

Директор – д-р. мед. наук, профессор Дидур М.Д.

2. Исполнители:

2.1. От ФГБУ ФНКЦСМ ФМБА России:

ведущий научный сотрудник организационно-исследовательского отдела – канд. мед. наук Митин И.Н.,

научный сотрудник организационно-исследовательского отдела – Назаров К.С.,
медицинский психолог отдела медико-психологического обеспечения спортивных сборных команд – Баршак С.И.,

медицинский психолог отдела медико-психологического обеспечения спортивных сборных команд – Суфиянова Л.Р.,

врач по спортивной медицине отдела медицинского обеспечения спортивных сборных команд и соревнований – Завьялов В.В.

2.2. От ИМЧ РАН:

заведующий лабораторией нейробиологии программирования действий – д-р. биол. наук, профессор Кропотов Ю.Д.

3. В настоящих методических рекомендациях реализованы требования Федеральных законов Российской Федерации:

- от 21 ноября 2011 года № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации»;

- от 4 декабря 2007 года № 329-ФЗ «О физической культуре и спорте в Российской Федерации»;

- от 5 декабря 2017 года № 373-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О физической культуре и спорте в Российской Федерации» и Федеральный закон «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» по вопросам медико-биологического обеспечения спортсменов спортивных сборных команд Российской Федерации и спортивных сборных команд субъектов Российской Федерации».

4. Утверждены и введены в действие Федеральным медико-биологическим агентством «27» июня 2024 г.

5. Введены впервые.

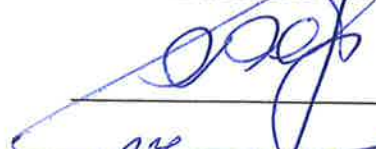
Содержание

Предисловие.....	2
1. Область применения	6
2. Нормативные ссылки	7
3. Определения и сокращения.....	9
4. Индивидуально-ориентированная технология нейровизуализации	10
4.1 Методика интегративной оценки функциональных систем головного мозга.....	10
4.1.1 Нейромаркеры функционального состояния мозга спортсменов	10
4.1.2 Стадии переработки информации в потенциалах, связанных с событиями	13
4.1.3 Психологические тесты	14
4.1.4 Сенсорные компоненты потенциалов, связанных с событиями	15
4.1.5 Множественные источники потенциалов, связанных с событиями	16
4.2 Организация исследования.....	17
4.3 Методика регистрации ЭЭГ	19
4.4 Методы статистического анализа.....	19
4.5 Метод выделения скрытых компонент	20
4.6 Сравнение ПСС между группами спортсменов и не спортсменов	22
4.7 Выводы исследования.....	29
5. Технология модуляции механизмов нейропластичности	30
5.1 Методика рТМС для модуляции механизмов нейропластичности	30
5.2 Апробационное исследование.....	37
5.2.1 Организация исследования.....	37
5.2.2 Результаты.....	40
6. Комбинированная методика визуализации и модуляции функционального состояния головного мозга спортсменов	43
6.1 Протокол методики	46
6.2 Апробационное исследование.....	50

6.2.1 Организация и методы исследования.....	50
6.2.2 Результаты.....	52
6.2.3 Выводы	57
Библиография.....	58
Библиографические данные	65
Список исполнителей.....	66

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель руководителя
Федерального медико-
биологического агентства


И. В. Борисевич
«27» июня 2024 г.


**ИНДИВИДУАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВИЗУАЛИЗАЦИИ И МОДУЛЯЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ
ГОЛОВНОГО МОЗГА У СПОРТСМЕНОВ СПОРТИВНЫХ СБОРНЫХ
КОМАНД РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ВИДА
СПОРТА, СПОРТИВНОЙ КВАЛИФИКАЦИИ И ПОЛОВОЗРАСТНЫХ
ОСОБЕННОСТЕЙ**

Методические рекомендации

МР ФМБА России 91500.12.0012-2024

1. Область применения

1. Настоящий документ предназначен для использования врачами, психологами и другими специалистами организаций ФМБА России, осуществляющими медико-биологическое обеспечение спортсменов сборных команд Российской Федерации.

2. Нормативные ссылки

Настоящий документ разработан на основании рекомендаций и требований, следующих нормативных правовых актов и нормативных документов.

Федеральный закон от 4 декабря 2007 года № 329-ФЗ «О физической культуре и спорте в Российской Федерации».

Федеральный закон от 21 ноября 2011 года № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации».

Федеральный закон от 05.12.2017 № 373-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О физической культуре и спорте в Российской Федерации» и Федеральный закон «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» по вопросам медико-биологического обеспечения спортсменов спортивных сборных команд Российской Федерации и спортивных сборных команд субъектов Российской Федерации».

Приказ Министерства здравоохранения РФ от 23 октября 2020 г. № 1144н «Об утверждении порядка организации оказания медицинской помощи лицам, занимающимся физической культурой и спортом (в том числе при подготовке и проведении физкультурных мероприятий и спортивных мероприятий), включая порядок медицинского осмотра лиц, желающих пройти спортивную подготовку, заниматься физической культурой и спортом в организациях и (или) выполнить нормативы испытаний (тестов) Всероссийского физкультурно-спортивного комплекса "Готов к труду и обороне" (ГТО)" и форм медицинских заключений о допуске к участию в физкультурных и спортивных мероприятиях».

Приказ Федерального медико-биологического агентства от 8 сентября 2023 года № 178 «Об утверждении порядка организации медико-биологического обеспечения спортсменов спортивных сборных команд Российской Федерации».

Рекомендации «Р» ФМБА России от 28 июня 2023 г. 1-2023 «Порядок разработки, изложения, представления на согласование и утверждение нормативных

и методических документов, разрабатываемых научными организациями по заказу ФМБА России, в Комиссию Федерального медико-биологического агентства по рассмотрению нормативных и методических документов, разработанных при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, осуществлении научно-технической и инновационной деятельности».

3. Определения и сокращения

В настоящем документе применяются следующие сокращения:

БОС	–	Биологическая обратная связь
МВП	–	Моторные вызванные потенциалы
МПП	–	Моторный порог покоя
ПСС	–	Вызванные потенциалы, связанные с событиями
СНВГ	–	Синдром нарушения внимания с гиперактивностью
ТМС	–	Транскраниальная магнитная стимуляция
ЦНС	–	Центральная нервная система
ЭЭГ	–	Электроэнцефалограмма
ICA	–	Independent component analysis, анализ независимых компонент
LORETA	–	Мозговая электромагнитная томография низкого разрешения
rTMS	–	Repetitive transcranial magnetic stimulation, ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция
TBS, СТП	–	Teta burst stimulation, протокол стимуляции тета-пачками

4. Индивидуально-ориентированная технология нейровизуализации

4.1 Методика интегративной оценки функциональных систем головного мозга

4.1.1 Нейромаркеры функционального состояния мозга спортсменов

Достижение высоких спортивных результатов связано с высоким уровнем физического и психологического напряжения в экстремальных ситуациях спортивных состязаний. Основной задачей элитного спорта является достижение спортсменом состояния спортивной формы в максимально короткие сроки и с наибольшей эффективностью [1]. Это обуславливает необходимость постоянного поиска новых подходов оценки функционального состояния мозга спортсмена и его модуляции. Методы индивидуальной оценки мозговой деятельности на основе анализа биоэлектрической активности мозга (электроэнцефалограммы или ЭЭГ) в покое и при выполнении психологических задач (метод потенциалов, связанных с событиями - ПСС) дают возможность оценить динамические изменения текущего состояния, обеспечивают возможность мониторинга изменений в ответ на тренировочные и психологические нагрузки, позволяет эффективно выявлять лимитирующие работоспособность факторы и выбирать наиболее адекватный подход коррекционных восстановительных мероприятий [2-4]. Помимо оценки функционального состояния эти методы позволяют конструировать индивидуальные протоколы нейромодуляции (например, транскраниальная стимуляция постоянным током, транскраниальная стимуляция переменным током), основанные на механизмах генерации биоэлектрической активности мозга (рис. 1) [5-6].



Рис. 1 – Схематическое представление основных целей нейронауки в спорте: от нейродиагностики к нейромодуляции

В качестве адекватного показателя функционирования мозга в настоящем проекте выбраны многоканальные потенциалы, связанные с событиями (ПСС). ПСС регистрируются во время выполнения испытуемым последовательной серии проб, состоящих из внешних стимулов и реакций испытуемого, выполняемых в соответствии с инструкцией, определяющей связь между стимулом и реакцией [2-3]. Фрагменты ЭЭГ в пробах усредняются, вычлняя реакции нейронов мозга из спонтанной ЭЭГ. Кроме того, регистрируются поведенческие параметры: количество пропусков целевых стимулов, количество ложных нажатий, время реакции (ВР) и вариабельность времени реакции [3]. Таким образом, данное электрофизиологическое обследование дает в руки исследователя три условных окна, через которые он (исследователь) смотрит на функционирующий мозг спортсмена (представлены на рис. 2).



Рис. 2 – Три вида нейромаркеров для оценки функционирования мозга спортсмена, участвующего в выполнении двигательной активности в ответ на целевые стимулы

Для получения ПСС событие может быть презентацией стимула с последующей сенсорной обработкой (такой как оценка цвета, формы или категории зрительного стимула) с помощью операции когнитивного контроля (например, выбор соответствующего ответа или подавление подготовленного действия), а также с помощью аффективных операций (например, связанных с положительными или отрицательными эмоциями) или операциями, связанными с памятью (например воспоминание или запоминание нового элемента). Событие также может быть двигательным ответом или другим типом ответа испытуемого.

В спортивной нейронауке и медицине, как правило, в качестве стимулов используются зрительные изображения, представляющие собой действия, характерные для данного вида спорта (например, рисунок баскетболиста, бросающего мяч в кольцо. В качестве ответной реакции используются нажатия на кнопку [7].

4.1.2 Стадии переработки информации в потенциалах, связанных с событиями

ПСС отражают этапы обработки информации в ответ на какое-либо событие. Этапы могут включать в себя паттерны активации/торможения в иерархически организованных сенсорных системах, вызванные сенсорным стимулом, паттерны активации/торможения в двигательных системах мозга, а также вовлечение когнитивных и аффективных систем мозга в процессы планирования, удержания в рабочей памяти и принятия решения, и потоком паттернов активации/ингибирования в исполнительных нейронных сетях с конечным результатом в действии. Гипотетические системы, которые имеют дело с различными этапами переработки информации, схематически представлены на рис. 3.



Рис. 3 – Стадии переработки информации (показаны стрелками) в функциональных системах мозга

Сенсорные системы извлекают сенсорную долю из входящей информации и выбирают наиболее важную часть ее в соответствии с механизмами внимания. Аффективная система извлекает эмоциональное содержание стимула и транслирует его в эмоции и чувства. Системы памяти добавляют предыдущий опыт в текущую ситуацию и консолидируют воспоминания о событии для будущего использования. Система когнитивного контроля планирует и инициирует соответствующие действия,

подавляет неактуальные действия и осуществляет мониторинг качества выполнения действий. Эти системы распределены в разных частях мозга и активируются в разные интервалы времени. Функционирование этих систем изучается с помощью различных поведенческих парадигм и отражается в различных компонентах ПСС.

4.1.3 Психологические тесты

Может быть использован практически любой компьютеризированный психофизиологический тест с последовательными предъявлениями стимулов.

Сенсорные компоненты ПСС определяются модальностью (зрительный, слуховой, соматосенсорный и т. д.), физическими особенностями в рамках модальности (например, пространственная частота, цвет, ориентация), категориями стимула (например, изображения лиц и цветов), частотой предъявления стимулов, интенсивностью стимула.

Для изучения двигательной системы в качестве событий используются действия, которые могут быть инициированы самостоятельно или запускаться определенными стимулами. Тесты на когнитивный контроль имитируют поведенческие ситуации, когда соответствующая внутренняя модель поведения формируется постановкой задачи и доминирует в течении всего задания, но в некоторых случаях это нарушается, и субъект должен заменить подготовленное действие другим или его подавить.

При изучении эмоциональной системы предъявляются эмоционально значимые стимулы, чтобы вызвать положительные или отрицательные эмоции. При изучении памяти стимулы могут запоминаться перед экспериментом, и испытуемые должны дифференцировать запомнившиеся стимулы от новых.

4.1.4 Сенсорные компоненты потенциалов, связанных с событиями

Рассмотрим зрительную систему, как наиболее изученную в нейронауках и несущую 90% всей информации, поступающей в мозг. Упрощенная схема потока зрительной информации в мозгу представлена на рис. 4а. Существуют два зрительных пути: (1) вентральный зрительный путь (на рисунке представлен зеленым цветом), в котором извлекается информация о форме, цвете и категории зрительного объекта, и (2) дорзальный зрительный путь (на рисунке представлен красным цветом), в котором извлекается информация о местоположении зрительного объекта в 3D-пространстве, что необходимо для ориентации и манипуляции со зрительными объектами [9].

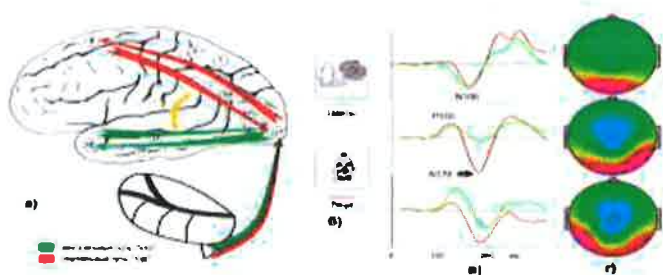


Рис. 4 – Зрительные пути мозга и соответствующие им компоненты ПСС.

а) вентральный (зеленые стрелки) и дорзальный (красные стрелки) пути, б) зрительные стимулы, в) вызванные реакции в вентральных и дорзальных путях, г) топограммы соответствующих компонент ПСС (данные взяты из архива лаборатории нейробиологии программирования действий ИМЧ РАН)

Поток информации внутри каждого пути иерархически организован. Каждая область коры принимает множество проекций обратной связи от более высоких областей и от ядер таламуса более высокого порядка (не показано на схеме) [12]. Вентральные и дорзальные потоки обмениваются информацией через взаимосвязанные пути.

Как видно из рисунка, в потенциалах, вызванных зрительным стимулом, отчетливо выделяются два вида компонент – затылочный (преимущественно дорзальный путь) и теменные (преимущественно вентральный путь) компоненты. Колебания потенциалов в компонентах отмечены буквой N для отрицательных, P для положительных отклонений и числом, которое приблизительно соответствует пиковой латентности (например, N1 или N100 соответствует отрицательной волне с пиковой латентностью около 100 мс).

4.1.5 Множественные источники потенциалов, связанных с событиями

Многочисленные исследования показывают, что зрительный стимул, предъявляемых даже на короткое время, активирует более двадцати функционально и морфологически различных областей мозга (см. Рис. 5).

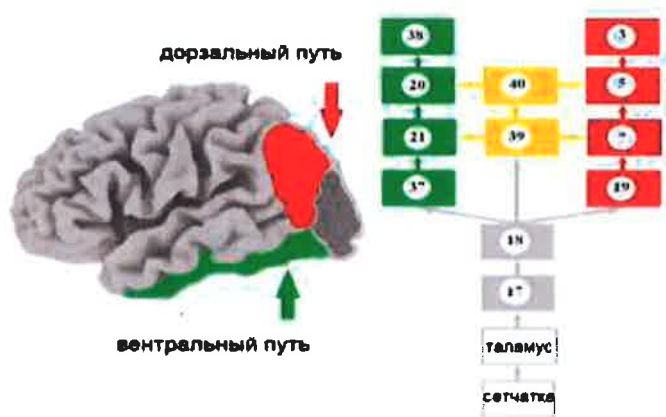


Рис. 5 – Множественные источники потенциалов, связанных с событиями.
 Слева – схематическое изображение дорзального и вентрального зрительных путей.
 Справа – поля Бродмана, составляющие эти пути

Существование множественных нейронных представлений стимула предполагает, что даже простой зрительный ПСС является суммой паттернов активации в пространственно разнесенных областях коры [13].

Для разделения компонент был использован метод взаимной диагонализации матриц ковариаций, впервые предложенный для групповых ПСС в лаборатории нейробиологии программирования действий ИМЧ РАН Кропотовым Ю.Д. и Пономаревым В.А. [17].

4.2 Организация исследования

В исследованиях приняли участие 40 спортсменов высшей квалификации в возрасте от 18 до 40 лет, из них 17 женщин. Присутствовали различные виды спорта: теннис, фехтование, бобслей, бокс, стрельба из лука, греко-римская борьба, синхронное плавание, велотрек. Эта группа дальше будет именоваться «Спорт».

Для сравнения использовались данные из нормативной базы HBI med, собранной на группе здоровых испытуемых из трех стран: Швейцарии, Норвегии и России, по методологии, разработанной в лаборатории нейробиологии программирования действий ИМЧ РАН (см описание в [22]). Из этой группы было выбрано 242 здоровых испытуемых в возрасте от 18 до 40 лет (115 женщин). Работа проводилась в соответствии с Хельсинской декларацией о проведении исследований с участием добровольцев. Все испытуемые дали письменное согласие на участие в исследовании после ознакомления с сущностью процедуры. Эта группа дальше будет именоваться «Норма».

На экране монитора предъявлялись две категории зрительных стимулов: по 20 различных изображений животных (Ж) и растений (Р). Изображения с угловыми размерами порядка 3.8° предъявлялись в центре экрана на белом фоне. Между предъявлением изображений оставался белый фон. Предъявление изображений не

сопровождалось миганием экрана монитора. Для предъявления стимулов использовалась программа Psytask.

Зрительный *Go / NoGo* тест состоял из 400 проб длительностью 3000 мс каждая по 100 проб каждой категории проб. В пробах предъявлялись пары зрительных стимулов (изображения животных – «Ж», растений – «Р» и людей – «Ч»), всего четыре категории проб «Ж-Ж», «Ж-Р», «Р-Р» и «Р-Ч». Длительность предъявления стимула – 100 мс, интервал между стимулами в пробе – 1000 мс. Первый стимул в пробе предъявлялся через 300 мс после ее начала. В пробах «Р-Ч» также предъявлялся звуковой стимул для поддержания уровня внимания. Пробы различного типа предъявлялись в псевдослучайном порядке. Участнику исследования давалось задание нажимать на кнопку только после предъявления пары «Ж-Ж» как можно быстрее и точнее (рис. 6).



Рис. 6 – Инструкция, которая предъявляется испытуемому на экране перед началом теста. Изображения животных и растений предъявляются парами в случайном порядке с интервалами внутри пары 1000 мс, интервалами между парами 3000 мс и длительностью стимулов 100 мс. Инструкция дается испытуемому нажимать на кнопку в ответ на пару «животное-животное» как можно быстрее и точнее

ПСС вычислялись отдельно для каждой категории типов проб (условий). Пробы, в которых задание выполнялось неправильно, исключались.

4.3 Методика регистрации ЭЭГ

Запись ЭЭГ выполнялась помощью компьютерного электроэнцефалографа «Мицар-ЭЭГ» (полоса пропускания – 0.53-50 Гц, режекторный фильтр 45-55 Гц, частота квантования – 250 Гц). Electroды располагались в соответствии с международной системой 10-20, референт – объединенные электроды, расположенные на мочках ушей, заземляющий – в отведении Fpz.

Для предварительной обработки данных использовалась программа WinEEG. Коррекция артефактов моргания проводилась путем обнуления соответствующих независимых компонент ЭЭГ. Также из дальнейшего анализа исключались пробы, содержащие артефакты. Артефактами считались фрагменты ЭЭГ в которых: (1) наблюдались потенциалы с амплитудой свыше 100 мкВ для всех регистрируемых электродов; (2) наблюдались медленные волны в диапазоне от 0.53 до 1 Гц, с амплитудой более 50 мкВ; (3) быстрые колебания сигнала в интервале частот от 20 до 35 Гц, с амплитудой более 35 мкВ. Эти пороговые значения были подобраны эмпирически в предыдущих исследованиях (см [23]).

4.4 Методы статистического анализа

Анализ поведенческих данных. Ошибки пропусков и ложных нажатий, а также время реакции оценивались с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни

Анализ ПСС. Перед выполнением статистической оценки скрытых компонентов был проведен предварительный анализ ПСС, чтобы продемонстрировать статистическую значимость различий ПСС между двумя группами. ПСС сравнивались с помощью кластерного теста перестановки [24],

реализованного в WinEEG (написанном Пономаревым В.А.). Эта процедура решила проблему множественных сравнений путем кластеризации данных на основе временной и пространственной близости.

По сути, процедура кластерного анализа была аналогична той, что реализована в наборе инструментов FieldTrip MATLAB для анализа магнитоэнцефалограмм и электроэнцефалограмм (свободно доступна по адресу <http://fieldtrip.fcdonders.nl/>; [25]), но отличалась в следующем: 1) для сравнения форм ПСС между группами использовался непараметрический критерий рангового знакового Уилкоксона вместо t -критериев зависимой выборки, как в FieldTrip MATLAB toolbox; 2) для статистики на уровне кластера использовалось нормальное приближение для знакового рангового критерия Вилкоксона и сумма z -баллов внутри кластера вместо суммы t -значений. Причиной использования непараметрической статистики была их меньшая чувствительность к выбросам.

4.5 Метод выделения скрытых компонент

Для выделения скрытых компонент использовался метод совместной диагонализации матриц ковариации групповых ПСС, описанный в [17].

Поведенческие показатели. Результаты статистического сравнения поведенческих показателей спортсменов и не спортсменов в GO/NOGO тесте представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Поведенческие параметры спортсменов (Спорт) и не спортсменов (Норма) в тесте GO/NOGO и уровни статистической значимости (р-значения) между группами (Разн)

Категория стимулов	Число испытуемых	Число пропусков	Число ложных нажатий	Время реакции (мс)	Вариабельность времени реакции
GO [Разн]				=0.21	p=0.72
NoGO [Разн]	-		=0.62		-
GO [спорт]	0	5.7%	.22%	80	8.1
NoGO [спорт]	0		.90%		0.0
GO [Норма]	42	.7%		402	8.7
NoGO [Норма]	42		.7%		

Примечание: 1) Спорт – спортсмены, 2) Норма – не-спортсмены, здоровые испытуемые, 3) Разн – вероятность различия двух групп (р-значения).

Как видно из таблицы, статистически значимых ($p < 0.01$) различий между группами не обнаружено. Данный результат говорит о том, что на поведенческом уровне выполнение общего когнитивного задания происходит одинаково.

4.6 Сравнение ПСС между группами спортсменов и не спортсменов

Проактивный когнитивный контроль. Результаты статистического сравнения усредненных между группой спортсменов и группой не спортсменов в ответ на первый стимул в пробах представлен на рис. 7. С точки зрения теории когнитивного контроля, в этом временном интервале развиваются процессы про-активного контроля (proactive cognitive control). Помимо сенсорных операций (детекция и распознавание зрительного стимула) мозг детектирует конфликт с базовой моделью поведения, реактивирует связь «стимул-реакция» (сформированную в ходе инструкции), формирует программы возможных ответных действий и удерживает их в рабочей памяти с целью оптимального реагирования на последующий триггерный (GO или NOGO) стимул.

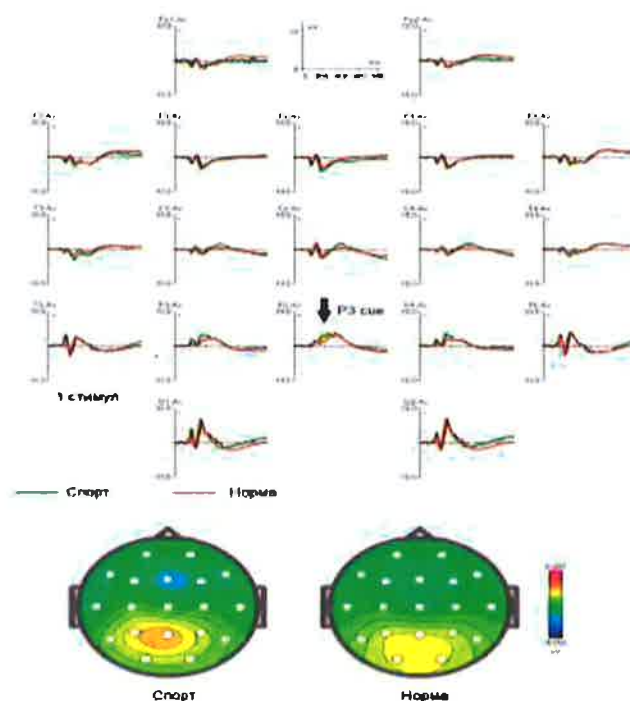


Рис. 7 – Потенциалы, связанные с событиями (ПСС), в ответ на первый значимый стимул (Ж) в тесте GO/NOGO в группе спортсменов (Спорт, зеленые линии) и в группе не-спортсменов (норма, красные линии). Волна P3 cue отмечена стрелкой.

Топографии этой волны для двух групп представлены внизу

Из рис. 7 видно, что волна P3 сие имеет разное распределение и разную мощность для двух групп, причем в группе спортсменов волна более локализована и ее амплитуда выше. Статистически сказанное подтверждается рис. 8, на котором представлены разностные кривые Спорт-Норма.

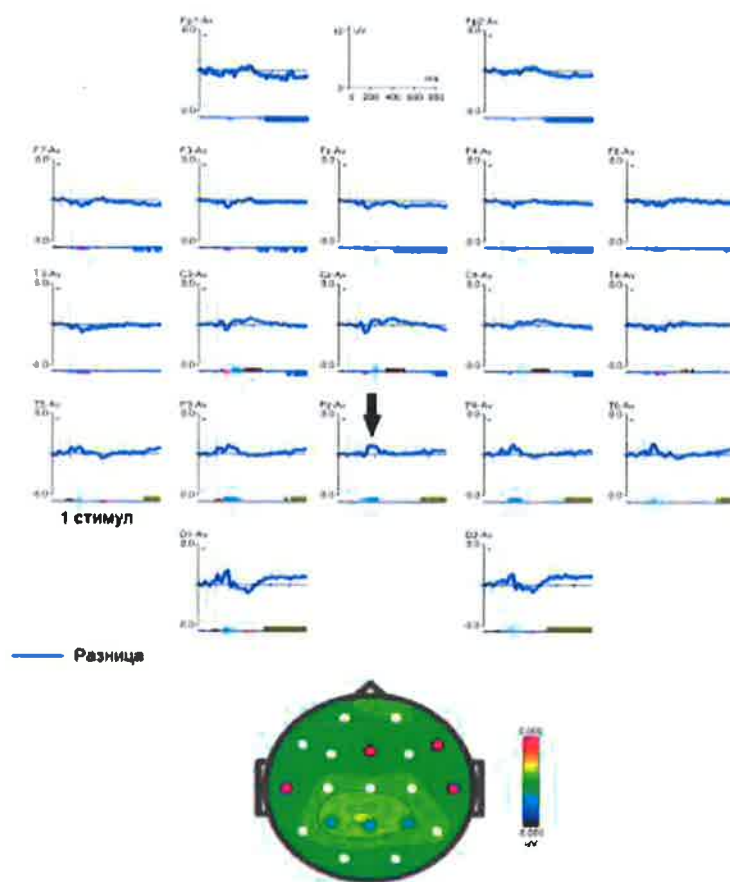


Рис. 8 – Разностные ПСС спортсмены-не спортсмены (синие линии) в ответ на первый стимул в паре (Ж). Результаты кластерного анализа (см. методика) представлены внизу графиков в виде вертикальных столбцов разных цветов. Цвет столбиков обозначает различные пространственно-временные кластеры, выделенные с вероятностью $p < 0.01$. Внизу представлена топограмма разностных кривых во временных отсчетах, обозначенных на графиках стрелками

Действительно, как видно из рис. 8, один из статистически значимых кластеров распределен над теменной областью и отражает вовлечение большего числа нейрона теменной области в психический процесс, гипотетически связанный с реактивацией связи Стимул-Реакция.

Применение метода совместной диагонализации матриц ковариаций позволяет выделить отдельные компоненты, связанные с указанными выше гипотетическими операциями. На рис. 9 эти компоненты представлены отдельно для сенсорных операций (слева) и операций про-активного когнитивного контроля (справа). Помимо сенсорных операций (детекция и распознавание зрительного стимула) мозг детектирует конфликт с базовой моделью поведения, реактивирует связь стимул-реакция (сформированную в ходе инструкции), формирует программы возможных ответных действий и удерживает их в рабочей памяти с целью оптимального реагирования на последующий триггерный (GO или NOGO) стимул.

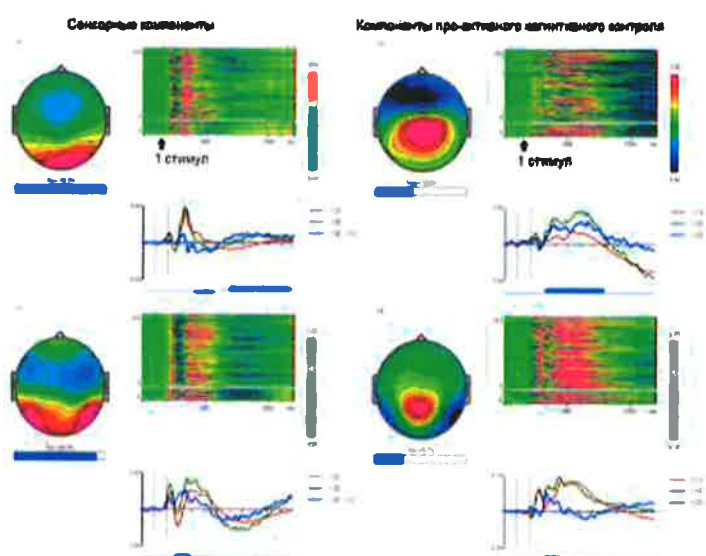


Рис. 9 – Скрытые компоненты, извлеченные из групповых ПСС в ответ на первый значимый стимул (Ж) в тесте GO/NOGO в группе спортсменов (зеленые линии) и в группе не-спортсменов (красные линии), а также разницы ПСС спортсмены-не спортсмены (синие линии). Каждая компонента характеризуется пространственным паттерном (топографией) и временным паттерном (динамикой отдельно для GO и

NOGO проб). Результаты кластерного анализа (см. методика) представлены внизу графиков в виде вертикальных столбцов. На растрах справа каждый испытуемый в исследовании представлен в виде линии, на которой цветом обозначена динамика компоненты

Реактивный когнитивный контроль. На рис. 10 представлены результаты статистического сравнения ПСС между двумя группами для ПСС в ответ на второй стимул, представляющих реакцию NOGO. Напомним, что в этом временном интервале развиваются процессы реактивного когнитивного контроля (reactive cognitive control), в котором помимо сенсорных операций (детекция и распознавание зрительного стимула) мозг детектирует конфликт с базовой моделью поведения, реактивирует связь стимул-реакция (сформированную в ходе инструкции), выбирает адекватную программу действия, а в случае NOGO стимула тормозит подготовленную программу.

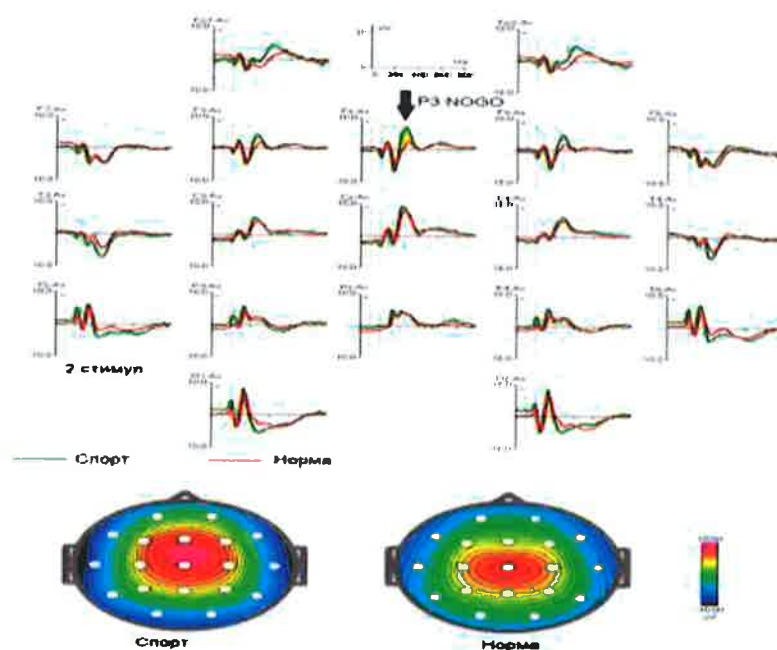


Рис. 10 – Потенциалы, связанные с событиями (ПСС), в ответ на второй значимый стимул (P) в пробах теста GO/NOGO (условие NOGO) в группе спортсменов (Спорт,

зеленые линии) и в группе не-спортсменов (норма, красные линии). Волна P3 NOGO отмечена стрелкой. Топографии этой волны для двух групп представлены внизу

Из рис. 10 видно, что NOGO стимул вызывает более сильную реакцию у спортсменов по сравнению с не спортсменами. Статистически это подтверждается кластерным анализом, представленным на рис. 11.

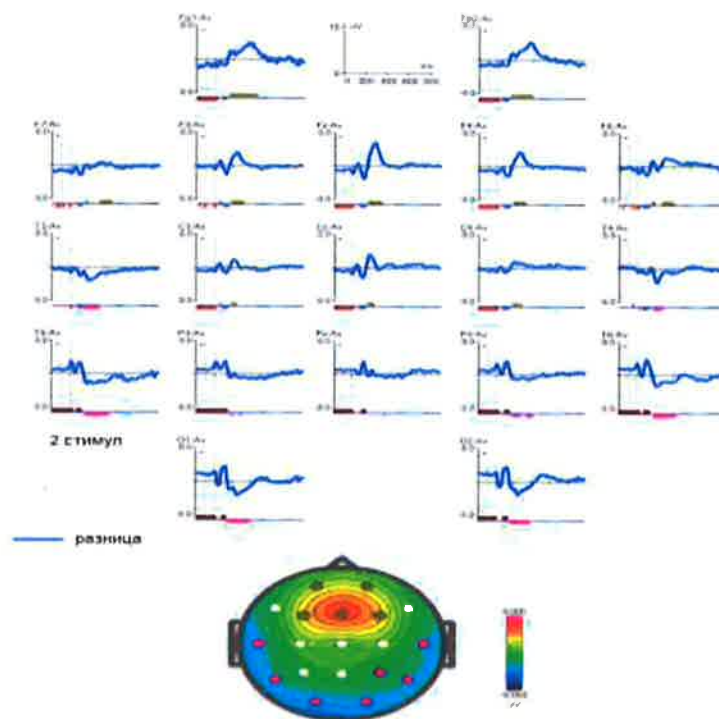


Рис. 11 – Разностные ПСС спортсмены-неспортсмены (синие линии) в ответ на второй стимул в паре (P – условие NOGO). Результаты кластерного анализа (см. методика) представлены внизу графиков в виде вертикальных столбцов разных цветов. Цвет столбиков обозначает пространственно-временной кластеры, выделенные с вероятностью $p < 0.01$. Внизу представлена топограмма разностных кривых во временных отсчетах, обозначенных на графиках стрелками

На рис. 12 представлены компоненты отдельно для сенсорных операций (слева) и операций реактивного когнитивного контроля (справа).

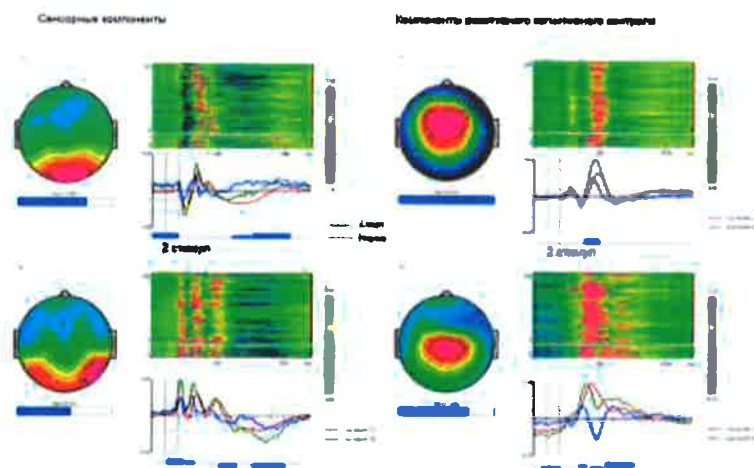


Рис. 12 – Скрытые компоненты, извлеченные из групповых ПСС в ответ на второй значимый стимул (P - NOGO) в тесте GO/NOGO в группе спортсменов (зеленые линии) и в группе не спортсменов (красные линии), а также разницы ПСС спортсмены-не спортсмены (синие линии). Каждая компонента характеризуется пространственным паттерном (топографией) и временным паттерном (динамикой отдельно для GO и NOGO проб). Результаты кластерного анализа (см. методика) представлены внизу графиков в виде вертикальных столбцов. На растрах справа каждый испытуемый в исследовании представлен в виде линии, на которой цветом обозначена динамика компоненты.

Помимо сенсорных операций (детекция и распознавание зрительного стимула) мозг детектирует конфликт с базовой моделью поведения (N2 флуктуация на рис. 12, справа сверху) и осуществляет мониторинг этой нестандартной ситуации (P3 флуктуация на рис. 12 справа сверху) и выбирает адекватную программу действий (компонент справа внизу).

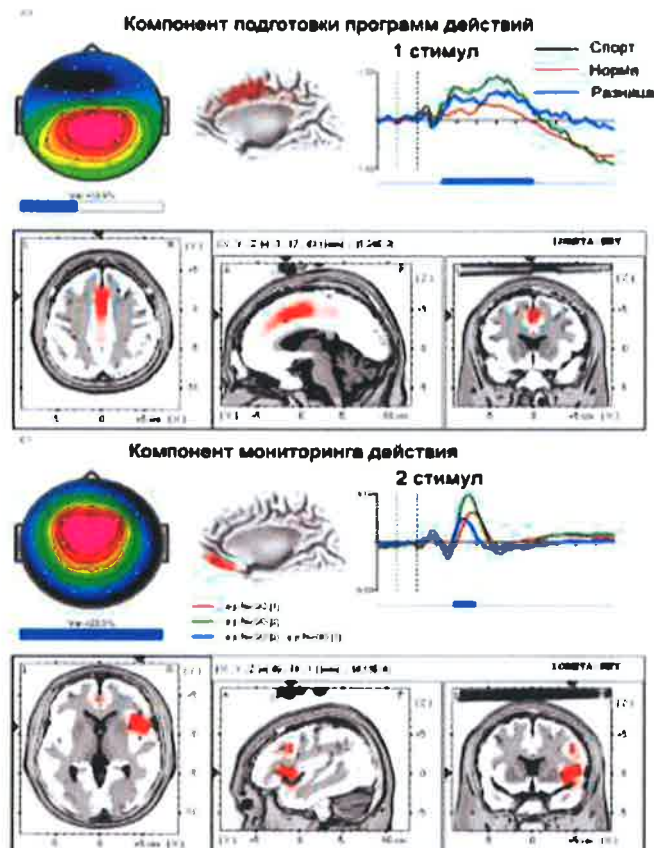


Рис. 13 – Компоненты, отражающие различие между группой спортсменов и группой неспортсменов с наибольшим размером эффекта. Сверху – компонент подготовки программ действий. Внизу – компонент мониторинга действия.

Помимо топограммы и динамики представлена томография низкого разрешения (LORETA)

Компоненты, отражающие различие между группами с наибольшим размером эффекта, представлены на рис. 13. Видно, что лобные области коры головного мозга активированы в большей степени у спортсменов по сравнению с не спортсменами. Эти данные могут служить основой для конструкции протоколов нейромодуляции.

4.7 Выводы исследования

Когнитивный контроль обеспечивает оптимальное смещение функций внимания, восприятия и исполнительного контроля поведения (действия) для осуществления целенаправленной деятельности. Выделяют два основных режима когнитивного контроля: проактивный и реактивный.

Процессы проактивного режима когнитивного контроля (proactive cognitive control) участвуют помимо сенсорных операций (детекция и распознавание зрительного стимула) в детекции конфликта с базовой моделью поведения, реактивируют связь стимул-реакция (сформированную в ходе инструкции), формируют программы возможных ответных действий и удерживают их в рабочей памяти с целью оптимального реагирования на последующий триггерный (GO или NOGO) стимул.

Реактивный режим когнитивного контроля (reactive cognitive control) также связан с сенсорными операциями (детекция и распознавание зрительного стимула), детекцией конфликта с базовой моделью поведения, реактивацией связи стимул-реакция (сформированную в ходе инструкции), выбором адекватной программы действия, но в случае NOGO стимула тормозит подготовленную программу, то есть происходит вовлечение дополнительных когнитивных усилий.

В ходе проведенного сравнительного анализа данных между группой спортсменов и не спортсменов были получены следующие результаты:

1. При сравнении поведенческих параметров выполнения теста, статистически значимых ($p < 0.01$) различий между двумя группами (спортсменов и неспортсменов) не обнаружено. Данный результат говорит о том, что на поведенческом уровне выполнение общего когнитивного задания происходит одинаково (или практически неразличимо) в двух исследованных группах.

2. При сравнении вызванных потенциалов головного мозга спортсменов и не спортсменов показано усиление режима *проактивного контроля* по сравнению с не

спортсменами. Это отражается в виде увеличения амплитуды и локализации компонент в теменной области и указывает на вовлечение большего числа нейрона теменной области в психический процесс, гипотетически связанный с реактивацией связи Стимул-Реакция.

3. При сравнении вызванных потенциалов головного мозга спортсменов и не спортсменов показано усиление режима реактивного контроля по сравнению с не спортсменами. Это отражается в виде увеличения амплитуды и локализации соответствующих компонент вызванных потенциалов, Кластерный анализ подтверждает этот результат и указывает на вовлечение большего числа нейронов в психические процессы, гипотетически связанных с подготовкой программ действий и мониторингом действия у спортсменов по сравнению с не спортсменами.

Сравнение групп спортсменов и не спортсменов позволяет предполагать наличие более эффективных механизмов всех режимов когнитивного контроля у спортсменов, по сравнению с не спортсменами.

5. Технология модуляции механизмов нейропластичности

5.1 Методика рТМС для модуляции механизмов нейропластичности

На основе анализа литературных данных [28-56], предложен протокол модуляции механизмов нейропластичности посредством ТМС с учетом результатов оценки индивидуальных особенностей мозговой деятельности.

При этом мы руководствовались следующими соображениями:

1) нейропластичность связана с памятью, процессы рабочей памяти связаны с тета-ритмом гиппокампа, гиппокампальный тета-ритм на поверхности головы человека проявляется в виде лобного тета ритма. Гипотетическая схема связи гиппокампального тета-ритма и лобного тета-ритма представлена на рис. 14.

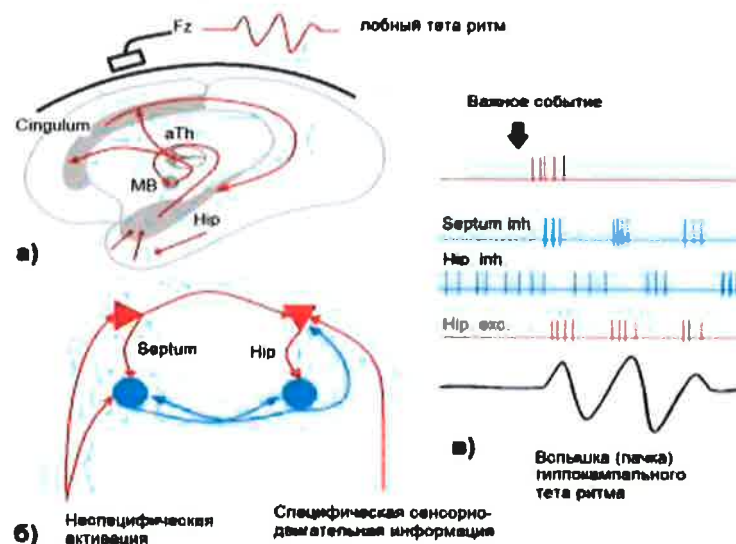


Рис. 14 – Гипотетические нейронные механизмы тета-ритма гиппокампа.

(а) Структуры мозга, в которых регистрируется тета-активность, образуют замкнутый контур. (б) Тета-ритм генерируется в септально-гиппокампальной сети с возбуждающими и тормозными взаимосвязями. (в) В состоянии покоя пирамидные клетки гиппокампа подвергаются торможению локальными тормозными нейронами, и «ворота» в систему памяти закрыты. Важное событие активирует тормозные нейроны перегородки, которые подавляют тормозные нейроны гиппокампа и, таким образом, снимают торможение и открывают «ворота». Этот цикл повторяется реципрокными возбуждительно-тормозными гиппокампально-септальными связями и генерирует пачку гиппокампального тета-ритма (адаптировано из [57])

2) Увеличение лобного тета ритма возникает при увеличении нагрузки на рабочую память и связано с изменениями модуляции информации в ней [57].

3) Увеличение лобного тета-ритма достигается методом вовлечения с помощью рТМС.

При разработке методики мы также руководствовались ограничением на длительность исследования и самой процедуры нейромодуляции, которое является существенным при работе со спортсменами высокого уровня. Поэтому для

уменьшения длительности стимуляции используется пачечную стимуляцию тета ритмом (СТП), частота которого определяется индивидуально.

Расположение катушки ТМС в терминах международной системы 10-20-схематически представлены на рис. 15.

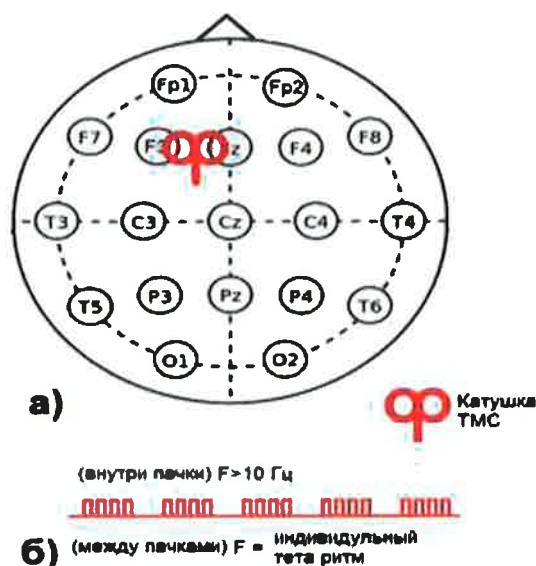


Рис. 15 – Схематическое представление методики рТМС. а) Расположение катушки для методики модуляции нейропластичности. б) последовательность импульсов ТМС

На рис. 15 схематически показан протокол модуляции механизма нейропластичности. Стимуляция производится пачками импульсов. Положение катушки определяется областью генерации лобного тета ритма – между электродами Fz и F3. Мощность стимуляции определяется как 80% от моторного порога покоя (МПП).

Частота внутри пачки выбирается равной частоте гамма ритма – 40 Гц. Частота следования пачек определяется индивидуально подобранным лобным тета ритмом.

Для определения индивидуального лобного тета-ритма предлагается использование математического теста с одновременной регистрацией биоэлектрической активности головного мозга (ЭЭГ). При анализе ЭЭГ оцениваются

спектральные характеристики ритмов, вычисляются характеристики тета ритма и определяется максимум спектральной мощности тета ритма в отведении Fz. Оценка индивидуального пика спектральной мощности тета ритма производится при анализе разности спектров в математическом тесте и в состоянии спокойного бодрствования с открытыми глазами. Положение пика на оси частот в этой разностной кривой определяет индивидуальную частоту лобного срединного тета ритма. В свою очередь, эта частота определяет частоту ТМС между пачками.

Математический тест состоит из 200 проб (Рис. 16).

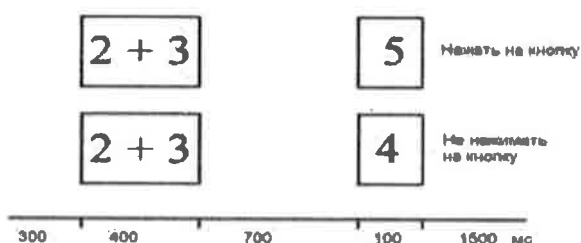


Рис. 16 – Схема математического теста (объяснение в тексте)

В каждой пробе предъявляются два зрительных стимула. Первый зрительный стимул длительностью 400 мс состоит из изображений двух чисел (черным на белом фоне), связанных арифметическим действием, например, $2+3$. Задача испытуемого заключается в том, чтобы произвести действие, получить результат и быть готовым нажать на кнопку, если второй стимул, следующий после начала первого стимула через 1100 мс, содержит полученное число (в данном примере 5), и воздержаться от нажатия (в данном примере 4). Ответы испытуемого регистрируются в отдельном канале, на основе которых вычисляются следующие поведенческие параметры: а) пропуски, б) ложные нажатия, г) среднее время реакции, д) дисперсия времени реакции.

Методика исследования мозговой активности спортсменов, результаты которой используются при настройке параметров рТМС включает в себя следующие процедуры:

А) регистрация ЭЭГ в состоянии спокойного бодрствования проводится с помощью хлорсеребряных электродов, установленных на поверхности головы с помощью электродного геля согласно международной системе 10-20 по 19 стандартным отведениям (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2) с частотой дискретизации 250 Гц в диапазоне частот 0,3 - 70 Гц при следующих условиях: а) Глаза открыты (ЕО) - не менее 5 минут; б) Глаза закрыты (ЕС) - не менее 5 минут;

Б) коррекция артефактов осуществляется с помощью методов независимых компонент (Рис. 17);

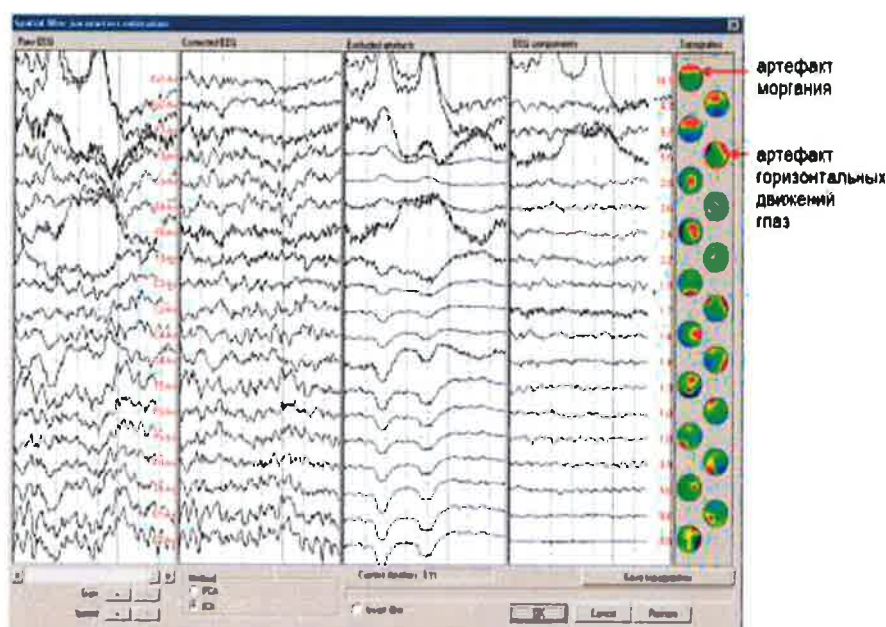


Рис. 17 – Коррекция артефактов глазных движений с помощью метода независимых компонент (описание в тексте)

Процедура коррекции глазных движений заключается в следующем: сначала 19-канальная ЭЭГ, содержащая артефакты глазных движений (Рис. 23, крайняя левая колонка) раскладывается на независимые компоненты, характеризующиеся

Удаление артефактов, не связанных с глазными движениями, осуществляются на основе экспериментально подобранных порогов. Артефактами считаются фрагменты ЭЭГ, амплитуда которых превышает 100 мкВ, амплитуда медленных волн которых превышает 50 мкВ, а амплитуда быстрых волн которых превышает 35 мкВ.

В) Вычисление спектров мощности ЭЭГ:

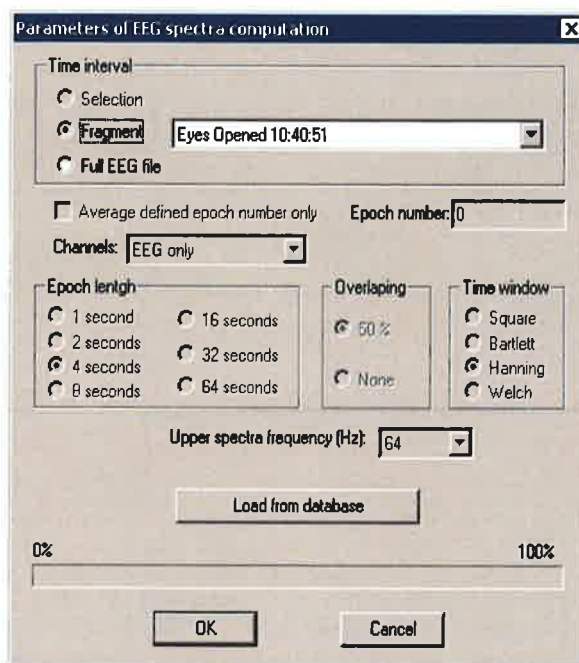


Рис. 19 – Параметры вычисления спектров мощности ЭЭГ.

Спектры мощности ЭЭГ в выбранном фрагменте (глаза открытые, глаза, закрытые математический тест) вычисляются с помощью метода быстрого преобразования Фурье. Параметры метода представлены на рис. 19: эпоха анализа – 4 с, перекрытие эпох – 50%, временное окно – окно Ханнинга.

Г) вычисление потенциалов, связанных с событиями (ПСС).

ПСС вычисляются методом усреднения для правильно выполненных проб. На рис. 20 представлены ПСС в математическом тесте, усредненные по группе здоровых испытуемых в возрасте от 20 до 26 лет (N=38).

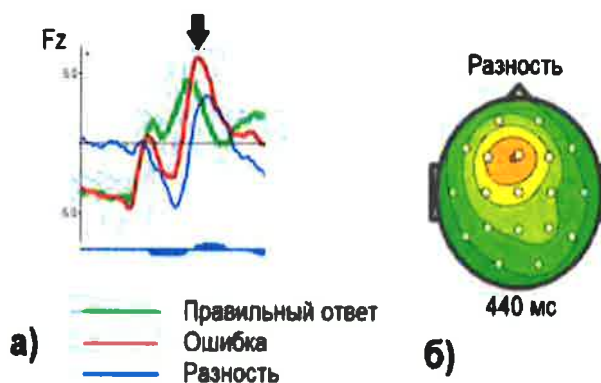


Рис. 20 – ПСС в математическом тесте, усредненные по группе здоровых испытуемых в возрасте от 20 до 26 лет (N=38). а) ПСС на второй стимул в Fz. Вертикальные пунктирные линии – предъявления второго стимула. Зеленые линии – результат вычисления соответствует предъявляемому стимулу (Правильный ответ). Красные линии – результат вычисления не соответствует предъявляемому стимулу (ошибка). б) Топография для разностной соответствуют интервалу времени, указанным стрелкой на кривой

5.2 Апробационное исследование

5.2.1 Организация исследования

Апробация методики модуляции механизмов нейропластичности посредством ТМС проводилась на базе учебно-тренировочного центра ФГБУ «Новогорск» в период с 04 июля 2022 года по 29 сентября 2022 года.

Исследование было выполнено на 16 мастерах спорта различных спортивных единоборств национальных сборных команд, (9 мужчин, 7 женщин, средний возраст – 25 лет). В период исследования спортсмены находились в подготовительном

периоде тренировочного процесса, имели ежедневные интенсивные тренировочные нагрузки, 2 тренировки в день.

Исследование проводилось по следующей схеме:

I фаза. Входная диагностика.

У каждого испытуемого были зарегистрированы параметры:

- 1) Фоновая 19-канальная ЭЭГ в состоянии с закрытыми (5 минут) и открытыми (5 минут) глазами;
- 2) 19-канальная ЭЭГ во время выполнения математического теста (20 мин) и соответствующие математическому тесту поведенческие показатели (точность и скорость ответов).

На основании анализа разницы в показателях между данными этапами вычислялись индивидуальные протоколы ТМС, реализованные в следующей фазе.

II фаза. ТМС

После определения индивидуального лобного тета ритма на разностной кривой спектров мощности ЭЭГ была проведена магнитная стимуляция.

III фаза. Контроль.

После окончания стимуляции проводилась регистрация параметров по протоколу, идентичному протоколу первой фазы:

- 1) Фоновая 19-канальная ЭЭГ в состоянии с закрытыми (5 минут) и открытыми (5 минут) глазами;
- 2) 19-канальная ЭЭГ во время выполнения математического теста (20 мин) и соответствующие математическому тесту поведенческие показатели (точность и скорость ответов).

Общее время исследования – 1 час 30 минут.

Стимуляция проводилась пачками из 3-х импульсов, частота внутри пачки составляла 40 Гц, а частота следования пачек выбиралась в соответствии с индивидуальным лобным тета-ритмом, либо фиксировалась на уровне 6Гц, если

индивидуальный лобный тета-ритм не определялся (см. рис. 21). Центр индуктора располагался между зонами Fz и F3 по системе 10-20.

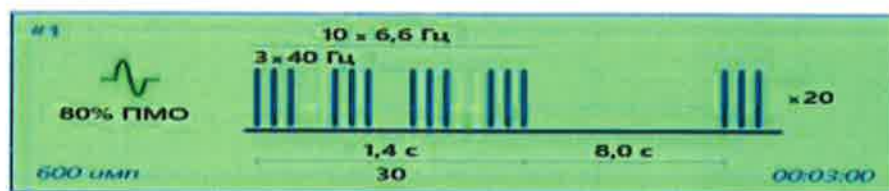


Рис. 21 – Схема протокола транскраниальной магнитной стимуляции* - 6,6 Гц – частота срединного тета-ритма, экспериментально выявленная у испытуемого

Интенсивность стимуляции составляла 80% индивидуального моторного порога покоя (такого значения интенсивности стимуляции, при котором моторный ответ наблюдается примерно в 50% случаев). Для определения индивидуального моторного порога перед началом исследования с каждым испытуемым проводилась специальная процедура. Сначала у испытуемого, перемещая катушку и подавая на неё одиночные импульсы ТМС, определяли моторную зону правой руки. Наличие моторного ответа определялось визуально. После нахождения моторной зоны индуктор фиксировался в найденной точке, и проводилась полуавтоматическая процедура определения индивидуального моторного порога. Эта процедура реализована с помощью метода последовательных приближений: аппарат подаёт поочередно импульсы интенсивностью ниже и выше предполагаемого моторного порога, постепенно приближаясь к нему (см. рис. 22).

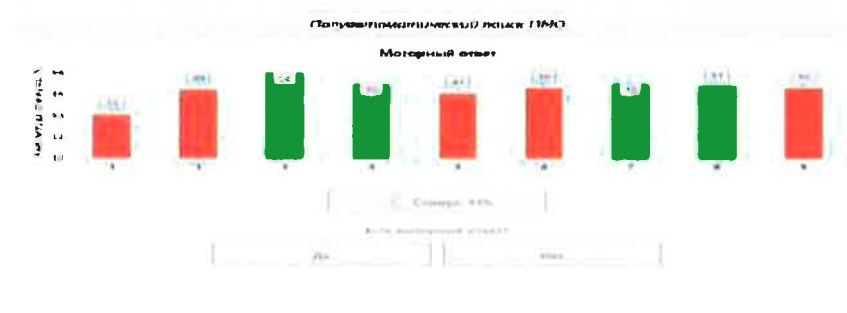


Рис. 22 – Полуавтоматическая процедура определения индивидуального порога моторного ответа

5.2.2 Результаты

Из 16 испытуемых только у шестерых отмечался лобный тета ритм в фоне. Этот результат соответствует среднему процентному составу людей с тета ритмом (20-40%) в европейских странах. Было отмечено улучшение поведенческих показателей, в частности, выявлено существенное сокращение времени реакции (Таблица 2).

Таблица 2 – Поведенческие данные до (ФОН) и после (ТМС) сеанса тета ТМС

	Пропуски	Ложные нажатия	Время реакции	Ошибка времени реакции
ТМС, Match	1.00%	-	402	14.4
ТМС, Mismatch	-	1.00%	-	-
ФОН, Match	4.00%	-	501	12.0
ФОН, Mismatch	-	0	-	-

На рис. 23 представлен пример одного из испытуемых с лобным тета ритмом в состоянии спокойного бодрствования до процедуры магнитной стимуляции (ФОН). Отчетливо видно наличие лобного тета ритма в виде пика на спектре мощности ЭЭГ в отведении Fz в состоянии спокойного бодрствования с открытыми глазами с

пиковой частотой 8.8 Гц (зеленая кривая). Видно также, что при выполнении математического теста (красная кривая) происходит значимое ($p < 0.05$) увеличение лобного тета ритма в соответствующем частном диапазоне и в соответствующей локализации. Соответствующая индивидуальная частота тета ритма была выбрана в качестве частоты стимуляции ТМС.

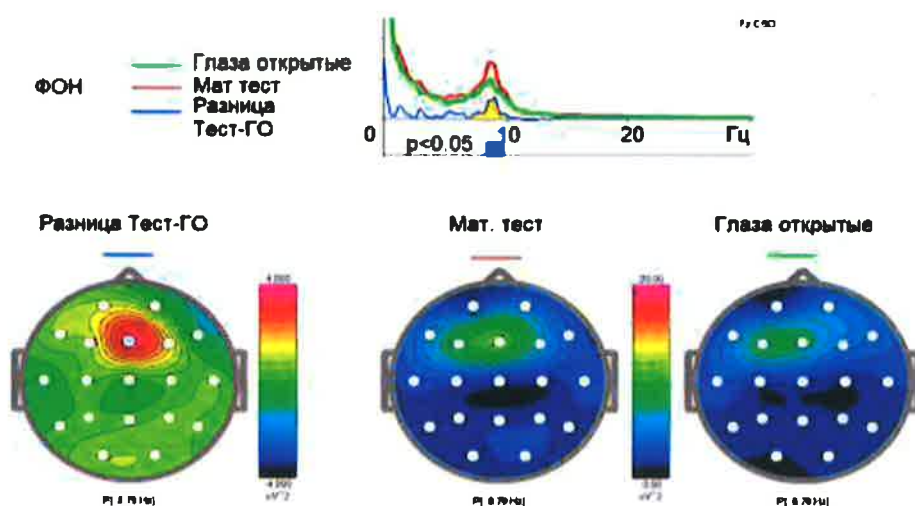


Рис. 23 – Определение частоты тета ритма одного из испытуемых до процедуры магнитной стимуляции (ФОН). Вверху – спектры мощности ЭЭГ в отведении Fz в состоянии спокойного бодрствования с открытыми глазами (зеленая кривая), при выполнении математического теста (красная кривая), а также разностная кривая (Тест-ГО) с показателями статистической значимости отличия ($p < 0.05$). Внизу – топографии соответствующих кривых на частоте индивидуального тета ритма

На рис. 24 представлен пример увеличения мощности лобного тета ритма у того же испытуемого ритмом в после процедуры ТМС на частоте определенного ритма. Спектры вычислены для фрагмента с выполнением математического теста. Отчетливо видно значимое увеличение мощности (но не частоты) лобного тета ритма после сеанса ТМС.

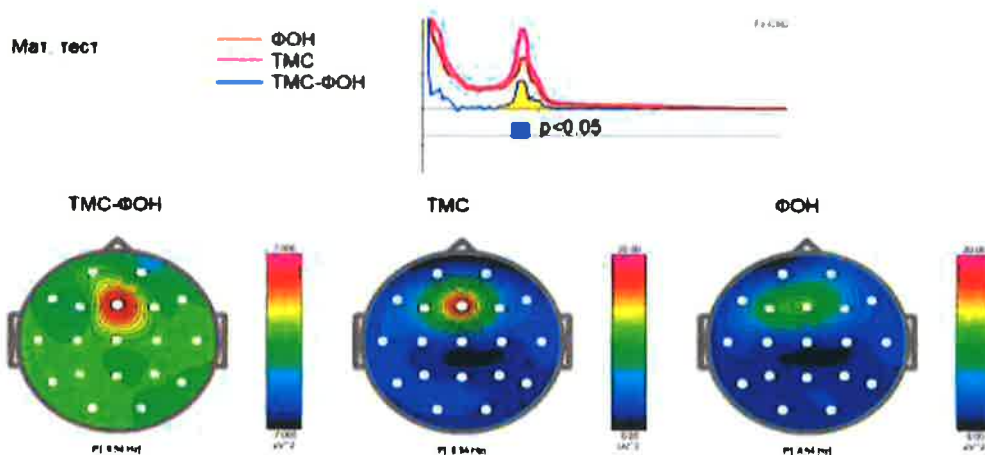


Рис. 24 – Увеличение мощности лобного тета ритма в математическом тесте у одного из испытуемых до процедуры магнитной стимуляции (ФОН). Вверху – спектры мощности ЭЭГ в отведении Fz при выполнении математического теста до (красная кривая) и сразу после сеанса ТМС (малиновая кривая), а также разностная кривая (ТМС-ФОН) с показателями статистической значимости отличия ($p < 0.05$). Внизу – топографии соответствующих кривых на частоте индивидуального тета ритма

Аналогичные результаты были получены еще у 5 испытуемых, у кого в состоянии спокойного бодрствования с открытыми глазами был отмечен пик в диапазоне 5.5-8.5 Гц. У остальных испытуемых (10 человек) не было обнаружено наличие лобного тета ритма, стимуляция проводилась на средней частоте (6 Гц), никаких статистически значимых ($p < 0.05$) изменений мощности тета ритма обнаружено не было.

6. Комбинированная методика визуализации и модуляции функционального состояния головного мозга спортсменов

По определению, ЭЭГ-биоуправление (neurofeedback) представляет собой метод саморегуляции с помощью биологической обратной связи (biofeedback), основанный на данных ЭЭГ. В этом методе (рис. 25) определенные текущие параметры ЭЭГ, зарегистрированные со скальпа (такие как мощности ритмов в заданной полосе частот), представляются субъекту через зрительные, слуховые или тактильные модальности. Субъект должен произвольно или непроизвольно (в зависимости от протокола) изменить эти параметры в заданном направлении, что приводит к повышению эффективности работы мозга.

Разность потенциалов между двумя точками на голове записывается с помощью двух электродов, усиливается и обрабатывается компьютером для извлечения необходимых параметров ЭЭГ-биоуправления из фоновой ЭЭГ. Параметр ЭЭГ-биоуправления отображается на экране компьютера.

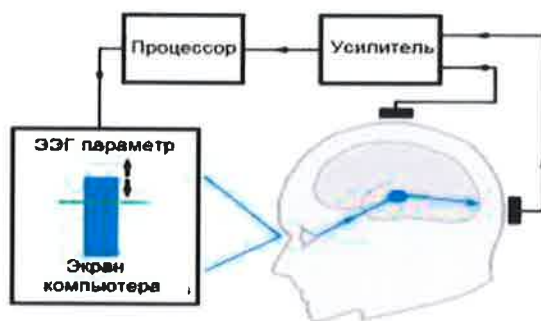


Рис. 25 – Схема методики биологической обратной связи по ЭЭГ

Разность потенциалов между двумя электродами после усиления поступает в процессор компьютера. Процессор в онлайн режиме извлекает параметр ЭЭГ-биоуправления, который отображается на экране в виде амплитуды синей

гистограммы. Субъекту необходимо удерживать параметр (синяя гистограмма) выше порогового значения (зеленая линия). Зрительная информация поступает в сетчатку глаза и через таламус достигает зрительной коры. В свою очередь, зрительная кора посылает информацию к аффективным и исполнительным системам мозга, таким образом, весь мозг принимает участие в ЭЭГ-биоуправлении

На рис. 25 поток информации схематически изображен стрелками. Нетрудно увидеть, что поток организован в замкнутом цикле, в котором мозг человека является ключевой частью. Проще говоря, мозг смотрит на себя как в зеркале и пытается адаптироваться так, чтобы оптимизировать параметр биоуправления. Специалист, проводящий ЭЭГ-биоуправление, должен ответить на следующие основные вопросы: (1) какой параметр ЭЭГ-биоуправления необходимо выбрать; (2) где должны быть размещены электроды; и (3) в каком направлении мозг должен адаптироваться? Ответы на эти вопросы определяют протокол ЭЭГ-биоуправления. Иногда используются другие названия этого метода — нейрофидбэк, нейрорегуляция, нейротерапия.

Анализируя литературу по ЭЭГ-БОС, следует признать, что ПСС представляют собой хороший инструмент для мониторинга изменений в функционировании мозга, вызванных сеансами нейрофидбэка. Эту методологию можно использовать на двух уровнях: (1) групповом уровне для оценки эффекта ЭЭГ-БОС тренинга на группе испытуемых, которые прошли один и тот же протокол БОС во время нескольких сеансов, (2) индивидуальном уровне для оценки эффекта БОС у одного испытуемого, который выполнял индивидуальный адаптированный протокол для улучшения определенной дисфункции мозга.

На рис. 26 показаны результаты влияния 20 сеансов ЭЭГ-БОС на ПСС у двух групп больных с синдромом нарушения внимания с гиперактивностью (СНВГ). Испытуемые тренировали способность произвольно повышать относительный лобный бета ритм, при этом разбивались на две группы: хорошие исполнители, которые сумели научиться произвольно повышать лобный бета ритм, и плохие

исполнители, которые, несмотря на все старания врачей, проводящих тренировки, не научились этого делать.

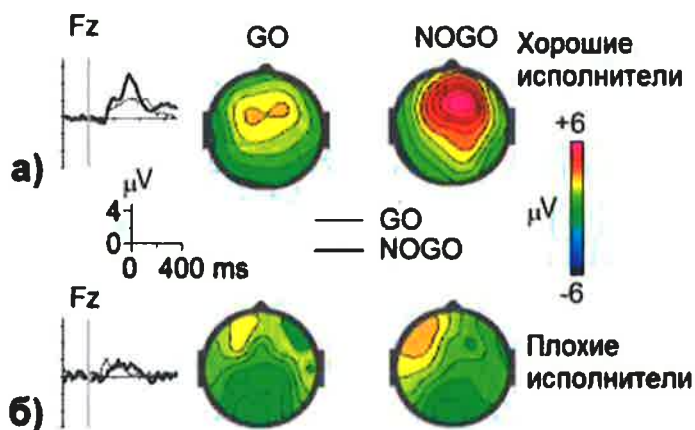


Рис. 26 – Влияние 20 сеансов тренировки по произвольному увеличению лобного бета ритма. ПСС в слуховом тесте GO / NOGO было записано до и после 20 сеансов.

На основании качества выполнения задания при тренировке ЭЭГ-БОС, пациенты были разделены на две группы: плохие исполнители и хорошие исполнители. (а)

Разницы (после-до) в ПСС на GO и NOGO стимулы и соответствующие им топограммы для хороших исполнителей; и (б) Тоже для плохих исполнителей (адаптировано из [65])

Пример применения ПСС для мониторинга эффекта индивидуально адаптированного протокола ЭЭГ-БОС представлен на рис. 26. Этот рисунок иллюстрирует случай 14-летнего подростка с СНВГ, который в спектрах ЭЭГ обнаруживал увеличение (по сравнению с нормой) мощности лобного бета ритма. На основе этих данных больному был назначен протокол БОС, направленный на тренировку мю-ритма и приводящий к релаксации аффективной (лимбической) системы мозга. ПСС в зрительном GO/NOGO тесте были записаны до и после 20 сеансов релаксационного протокола - тренинга мю-ритма. Можно видеть увеличение волны P3 NOGO (рис. 27 б), но не волны P3 GO (рис. 27 а) после тренировки.

Эти данные показывают, что ПСС в GO/NOGO тесте являются надежным и чувствительным показателем функционального состояния системы когнитивного контроля и могут быть использованы как на групповом уровне, так и на индивидуальном уровне.

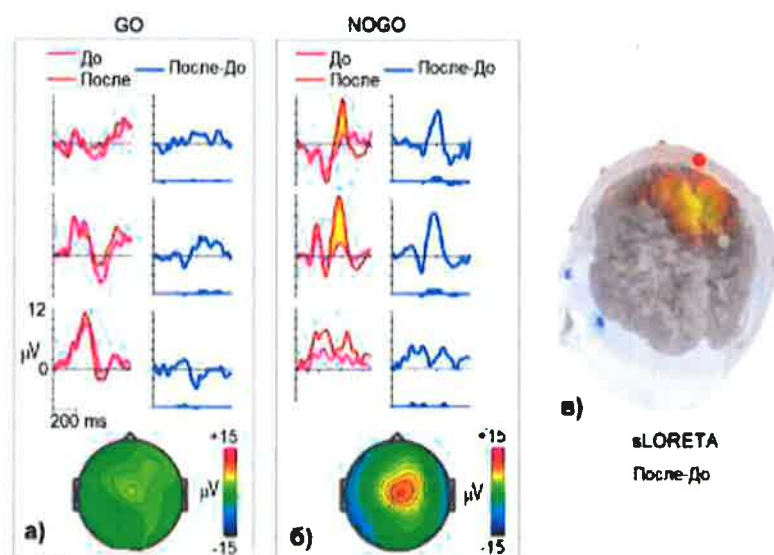


Рис. 27 – Эффект 20 сеансов ЭЭГ-БОС на индивидуальные ПСС. ПСС в GO/NOGO тесте были зарегистрированы у подростка с СНВГ до (обозначены розовым цветом) и после (обозначены красным цветом) 20 сеансов БОС по увеличению мю-ритма. (а) ПСС ДО и ПОСЛЕ и их разностные кривые (После-До) для условия GO; (б) ПСС ДО и ПОСЛЕ и их разностные кривые (После-До). (в) *p* (с) sLORETA различия ПСС для состояния NOGO.

6.1 Протокол методики

Схема протокола комбинированной методики регуляции функциональных систем головного мозга спортсмена посредством ТМС и технологий нейробиоуправления с учетом результатов оценки индивидуальных особенностей мозговой деятельности представлена на рис. 28. Протокол состоит из двух последовательных этапов, занимающих соответственно 10 и 20 минут.

На первом этапе катушка магнито-стимулятора устанавливается над областью коры мозга, которую требуется активировать или тормозить в зависимости от индивидуальных особенностей спортсмена и его состояния в данный момент.

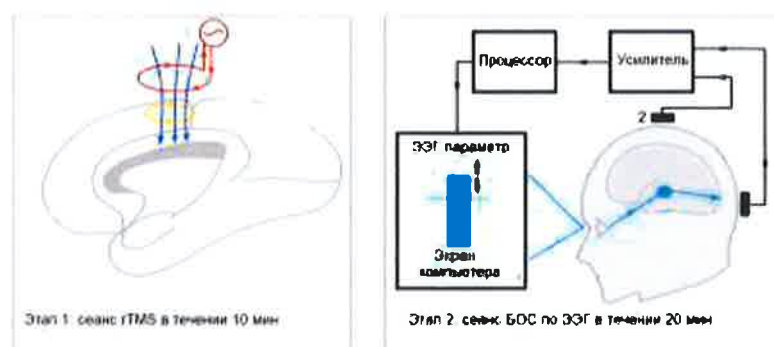


Рис. 28 – Схема протокола комбинированной методики регуляции функциональных систем головного мозга спортсмена посредством ТМС и технологий нейробиоуправления с учетом результатов оценки индивидуальных особенностей мозговой деятельности

Для активирующего протокола выбирается высокочастотная рТМС (частотой 10 Гц), для тормозного протокола, снижающего метаболическую активность в стимулируемой области во время проведения сеанса стимуляции, выбирается низкочастотная рТМС [26].

На втором этапе комбинированной методики регуляции функциональных систем головного мозга спортсмена для удержания активирующего или тормозного эффекта ТМС используется методика ЭЭГ-БОС. Для этого на поверхность головы, находящийся над выбранной зоной коры головного мозга, устанавливаются два электрода на расстоянии 2-3 см для регистрации биполярной ЭЭГ. Тип протокола выбирается в зависимости от знака ТМС воздействия, активирующего или тормозящего (релаксирующего).

Существует достаточно много протоколов ЭЭГ-биоуправления, однако “золотой стандарт” не разработан. Исследовательские и коммерческие группы, проводя эксперименты с различными протоколами ЭЭГ-биоуправления, не предоставили доказательства их эффективности. Из дидактических соображений мы разделяем протоколы ЭЭГ-БОС, основанные на данных ЭЭГ, на две большие категории: активирующие и релаксирующие протоколы. Это разделение основано на данных о корреляции между активностью ЭЭГ различных частотных диапазонов и метаболической активностью по результатам позитронно-эмиссионной томографии или функциональной магнитно-резонансной томографии в соответствующих зонах коры (см. вставку «б» на рис. 29).

Активирующие протоколы заключаются в увеличении мощности ЭЭГ в бета диапазоне или уменьшении мощности ЭЭГ в альфа диапазоне. Релаксирующие протоколы состоят в увеличении мощности ЭЭГ в альфа диапазоне или уменьшении мощности ЭЭГ в бета диапазоне. Хотя важность локализации электродов трудно переоценить, ниже из дидактических соображений мы рассматриваем протоколы вне связи с электродной локализацией.

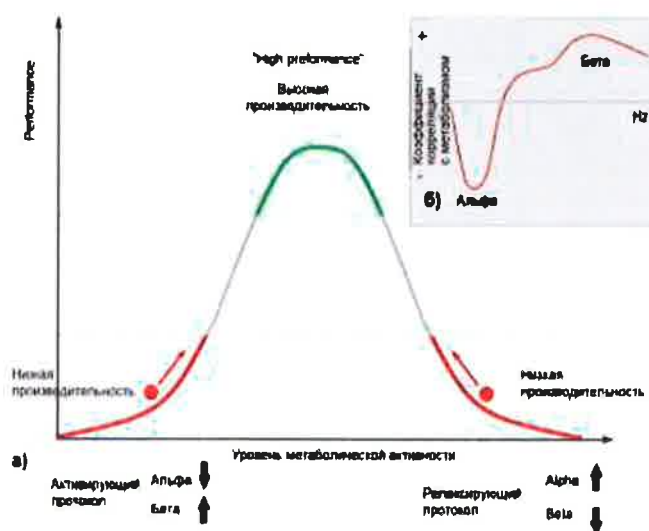


Рис. 29 – Протоколы активационной и релаксационной ЭЭГ-БОС (схема). (а) Закон «инвертированного U» определяет связь между общей (метаболической) активностью нейронной системы и эффективностью ее работы. Слишком низкий и

слишком высокий уровень активации нейронов связан с плохой производительностью, в то время как промежуточная активация связана с максимальной (оптимальной) производительностью – high preformance. (б) С учетом противоположной корреляции альфа- и бета-спектров мощности с метаболической активностью протоколы на крайних сторонах перевернутой U-кривой различны: активация на низком метаболическом уровне и релаксация на высоком метаболическом уровне

Активирующий бета тренинг — общепринятый метод, используемый для разнообразных целей. Протокол направлен на активацию определенной области коры. В нашей практике в процессе относительного бета тренинга у детей с СНВГ мы иногда сталкиваемся с феноменом «ага», при котором инструктор вдруг обнаруживает конкретное ментальное состояние, связанное с генерацией высокоамплитудной, бета активности в лобных областях. Дети обычно говорят: «Ага, теперь я знаю, что значит быть внимательным!». Возможные негативные побочные эффекты могут включать возбуждение, раздражительность или ощущение гиперактивности. Поэтому продолжительность сеанса может составлять лишь 10 минут, но все же обычно доходит до 20-30 минут. Часто бета тренинг проводится в конце сеанса, чтобы вызвать у пациента состояние бодрости и энергичности.

Альфа (8-12 Гц) релаксирующий тренинг — общепринятый метод, используемый для многих целей. Как правило, он направлен на деактивацию, торможение соответствующих зон коры. При релаксирующем тренинге часто предъявляются слуховые стимулы, поскольку зрительные стимулы активируют и десинхронизируют ЭЭГ в большей степени, чем слуховые. Как показывает опыт сотрудников нашей лаборатории, усиление задних альфа- или центральных мю-ритмов обеспечивает самые лучшие результаты релаксирующего тренинга.

6.2 Апробационное исследование

6.2.1 Организация и методы исследования

В исследованиях приняли участие 9 спортсменов высшей квалификации в возрасте от 18 до 23 лет, из них 4 женщин. Присутствовали следующие виды спорта: теннис, фехтование, стрельба из лука, синхронное плавание, велотрек. Вследствие невозможности разбиения группы на представительные подгруппы оценивались показатели группы в целом и изменения этих показателей под воздействием комбинированной методики регуляции функционального состояния головного мозга.

Для регуляции функционального состояния головного мозга и мозговых систем, вовлеченных в обеспечение деятельности спортсмена, применялась комбинированная методика ТМС и нейробиоуправления по разработанному на предыдущем этапе протокол.

Оценка эффективности применения комбинированной методики регуляции функционального состояния головного мозга и мозговых систем, вовлеченных в обеспечение деятельности спортсмена посредством ТМС и технологий нейробиоуправления осуществлялась с использованием потенциалов, связанных с событиями (ПСС), в тесте GO/NOGO с предупреждением. Психологический тест для оценки функционального состояния мозга человека, методика регистрации ЭЭГ, а также методы статистического анализа подробно рассмотрены в главе 5 настоящих методических рекомендаций.

Комбинированная методика регуляции функционального состояния головного мозга посредством ТМС и нейробиоуправления.

Комбинированная методика регуляции функционального состояния головного мозга посредством ТМС и нейробиоуправления схематически представлена на рис. 30. Методика основывается на применении двух методов активации корковых нейронных сетей: метода высокочастотной ТМС, направленного на прямую электро-

магнитную стимуляцию корковых нейронов, и метода биологической обратной связи, направленного на использования собственных ресурсов мозга человека в опосредованном увеличении активности нейронов мозга за счет тренировки высокочастотной составляющей ЭЭГ соответствующих корковых областей.

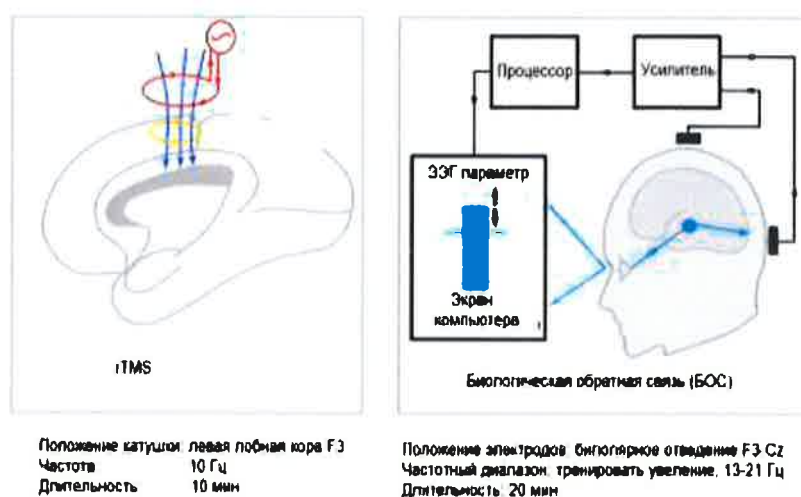


Рис. 30 – Схема комбинированной методики регуляции функционального состояния головного мозга посредством ТМС и нейробиоуправления.

Методика высокочастотной (активирующей) ТМС: положение катушки – область F3, частота 10 Гц, длительность – 10 минут.

Методика биологической обратной связи (БОС) – положение электродов биполярное – F3-Cz, частотный диапазон – 13-21 Гц, диапазон низкочастотной бета-активности, длительность – 20 минут, тренировать увеличение параметра БОС.

На рис. 31 представлена общая схема эксперимента. Он состоит из комбинации двух воздействий на кору головного мозга спортсмена, непосредственной (ТМС) и опосредованной стимуляции (БОС), а также оценки функционального состояния мозга спортсмена ДО и ПОСЛЕ воздействия.

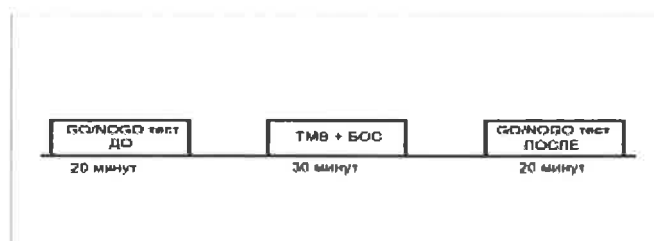


Рис. 31 – Общая схема эксперимента.

6.2.2 Результаты

Поведенческие показатели. Результаты статистического сравнения поведенческих показателей спортсменов и не спортсменов в GO/NOGO тесте представлены в Таблице 3.

Таблица 3 – Поведенческие параметры спортсменов в тесте GO/NOGO в двух состояниях: ДО и ПОСЛЕ комбинированного воздействия на мозг, и уровни статистической значимости (р-значения) между состояниями (Разн)

Категория стимулов	Число испытуемых	Число пропусков	Число ложных нажатий	Время реакции (мс)	Вариабельность времени реакции
GO [Разн]				NS	NS
NoGO [Разн]	9		S		
GO [ДО]		.4	.60	98	8.3
NoGO [ДО]					
GO [ПОСЛЕ]		3.0		379	8.2
NoGO [ПОСЛЕ]			.67		

Примечание: Разн – вероятность различия двух состояний ДО и ПОСЛЕ (NS – Non Significant, незначимое различие).

Как видно из таблицы, статистически значимых ($p < 0.01$) различий между двумя состояниями не обнаружено.

Сравнение ПСС между двумя состояниями ДО и ПОСЛЕ в когнитивном контроле

Проактивный когнитивный контроль. Результаты статистического сравнения усредненных ПСС между двумя состояниями в ответ на первый стимул в пробах представлен на рис. 32. С точки зрения теории когнитивного контроля в этом временном интервале развиваются процессы про-активного когнитивного контроля (proactive cognitive control). Помимо сенсорных операций (детекция и распознавание зрительного стимула) мозг детектирует конфликт с базовой моделью поведения, реактивирует связь стимул-реакция (сформированную в ходе инструкции), формирует программы возможных ответных действий и удерживает их в рабочей памяти с целью оптимального реагирования на последующий триггерный (GO или NOGO) стимул.

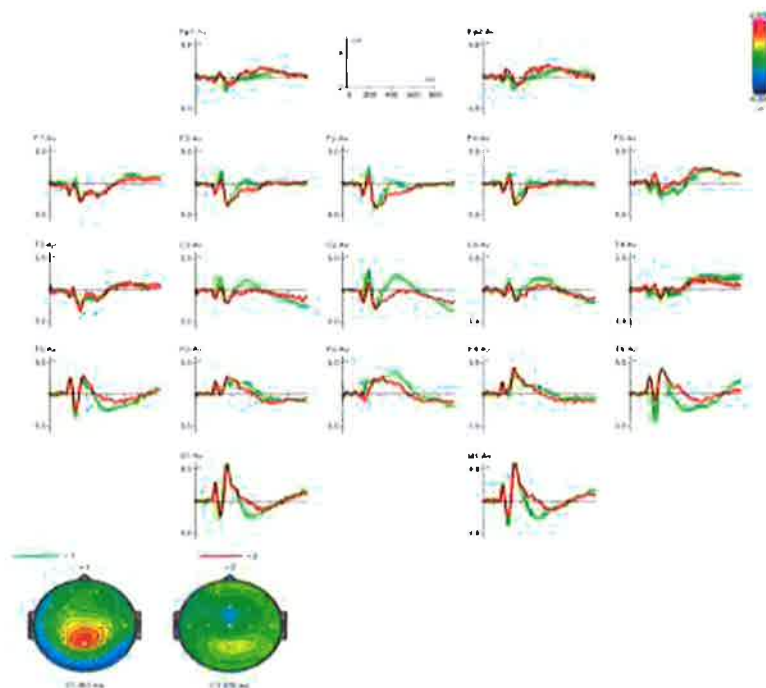


Рис. 32 – Потенциалы, связанные с событиями (ПСС), в ответ на первый значимый стимул (Ж) в тесте GO/NOGO в состояниях ДО (красные линии) и ПОСЛЕ (зеленые

линии) комбинированного воздействия на мозг. Волна Р3 сие отмечена стрелкой.

Топографии этой волны для двух групп представлены внизу

Из рис. 32 видно, что волна Р3 сие имеет разное распределение и разную мощность для двух состояний причем в состоянии ПОСЛЕ волна более локализована и ее амплитуда выше. Сказанное подтверждается рис. 33, на котором представлены разностные кривые ПОСЛЕ-ДО с уровнями статистической значимости.

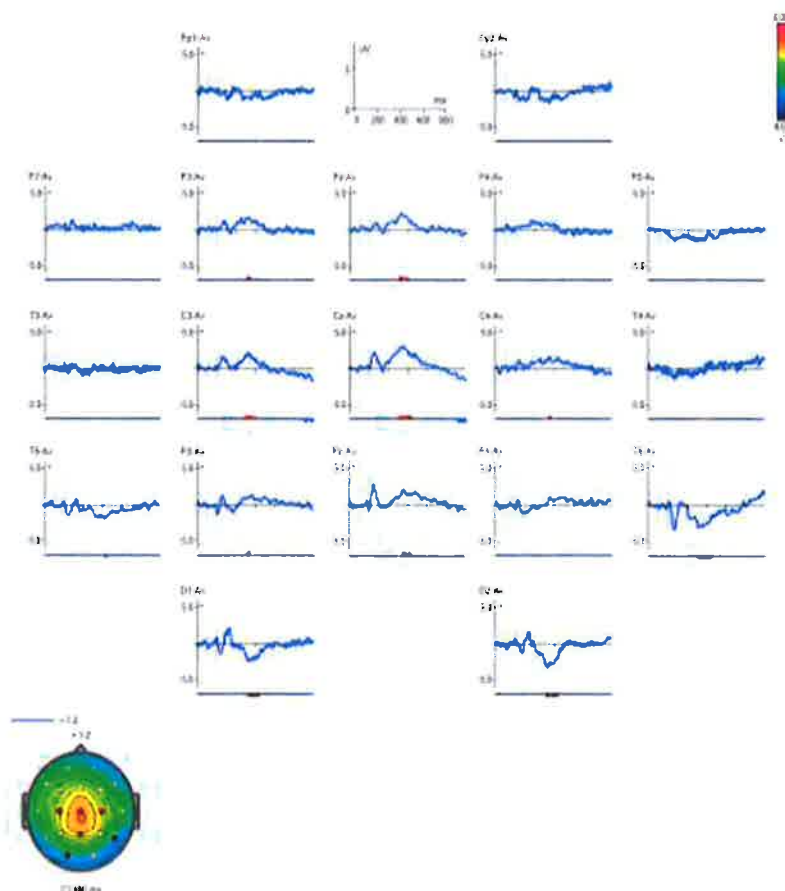


Рис. 33 – Разностные ПСС ПОСЛЕ-ДО (синие линии) в ответ на первый стимул в паре (Ж). Результаты кластерного анализа (см. методика) представлены внизу графиков в виде вертикальных столбцов разных цветов. Цвет столбиков обозначает различные пространственно-временные кластеры, выделенные с вероятностью $p < 0.01$. Внизу представлена топограмма разностных кривых во временных отсчетах, обозначенных на графиках стрелками

Действительно, как видно из рис. 33, один из статистически значимых кластеров распределен над теменной областью и отражает вовлечение большего числа нейрона теменной области в психический процесс, гипотетически связанный с реактивацией связи Стимул-Реакция.

Реактивный когнитивный контроль. На рис. 34 представлены результаты статистического сравнения ПСС между двумя состояниями для ПСС в ответ на второй стимул, представляющих реакцию NOGO. Напомним, что с точки зрения теории когнитивного контроля в этом временном интервале развиваются процессы реактивного когнитивного контроля (reactive cognitive control). В процессе реактивного когнитивного контроля помимо сенсорных операций (детекция и распознавание зрительного стимула) мозг детектирует конфликт с базовой моделью поведения, реактивирует связь стимул-реакция (сформированную в ходе инструкции), выбирает адекватную программу действия, а в случае NOGO стимула тормозит подготовленную программу.

Graphs and maps of ERP

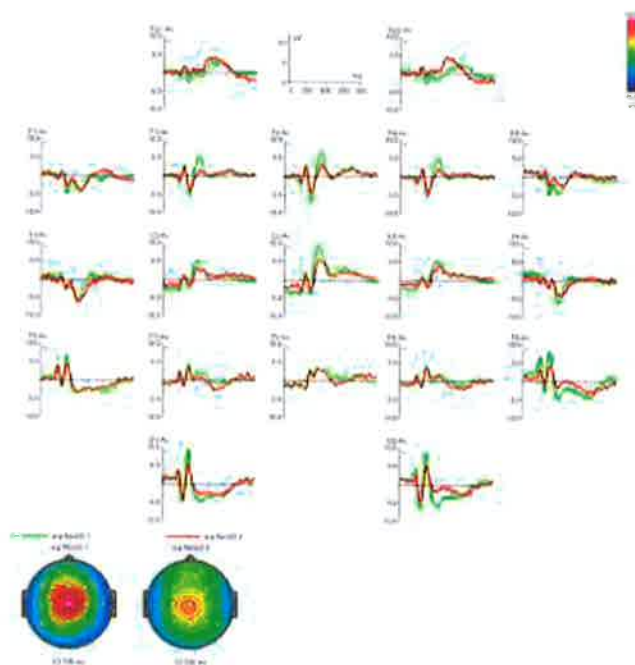


Рис. 34 – Потенциалы, связанные с событиями (ПСС), в ответ на второй значимый стимул (Р) в пробах теста GO/NOGO (условие NOGO) в состоянии ПОСЛЕ (зеленые

линии) и ДО (красные линии). Топографии этой волны для двух групп представлены
внизу

Из рис. 34 видно, что NOGO стимул вызывает более сильную реакцию у спортсменов после комбинированного воздействия на лобные доли. Статистически это подтверждается кластерным анализом, представленным на рис. 35.

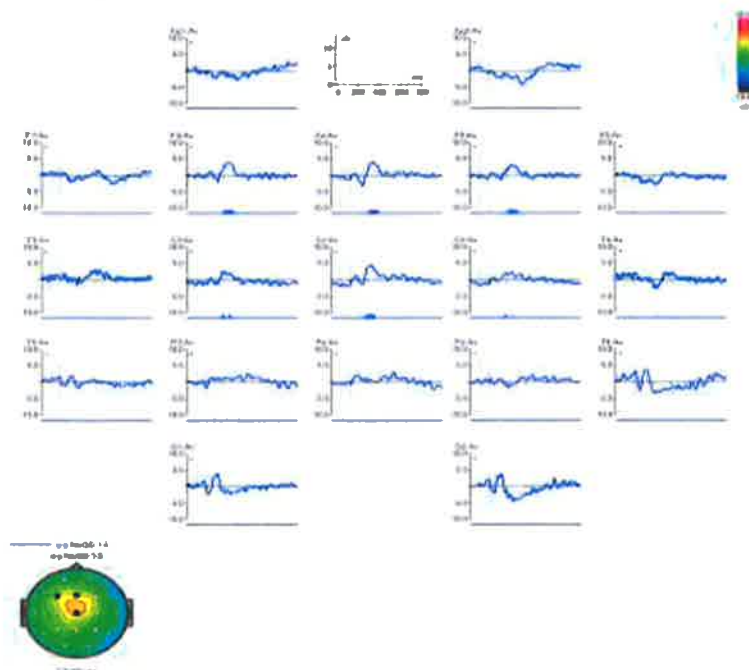


Рис. 35 – Разностные ПСС ПОСЛЕ-ДО (синие линии) в ответ на второй стимул в паре NOGO. Результаты кластерного анализа (см. методика) представлены внизу графиков в виде вертикальных столбцов разных цветов. Цвет столбиков обозначает пространственно-временной кластеры, выделенные с вероятностью $p < 0.01$. Внизу представлена топограмма разностных кривых во временных отсчетах, обозначенных на графиках стрелками.

6.2.3 Выводы

1. На основе данных литературы предложен протокол комбинированной методики регуляции функциональных систем головного мозга спортсмена посредством применения ТМС технология, с целью активации или торможения определенной области коры мозга человека, и последующей за ней методикой биоуправления, с целью закрепления и длительного удержания результатов действия ТМС.

2. Применение этого протокола для активации лобных областей коры на ограниченной группе спортсменов показало эффективность этой методики.

3. Показано, что мозговые показатели проактивного и реактивного когнитивного контроля в виде компонент ПСС в GO/NOGO тесте увеличиваются по амплитуде под влиянием комбинированной методики регуляции функциональных систем головного мозга.

Библиография

- [1] Yarrow K, Brown P, Krakauer JW. Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports. *Nat Rev Neurosci*. 2009 Aug;10(8):585-96. doi: 10.1038/nrn2672. Epub 2009 Jul 1. Erratum in: *Nat Rev Neurosci*. 2009 Aug;10(8):following 596. PMID: 19571792.
- [2] John, E. R. (1990). Principles of Neurometrics. *American Journal of EEG Technology*, 30, 251-266.
- [3] Kropotov, J.D. (2009). *Quantitative EEG, event-related potentials and neurotherapy*. Amsterdam, London: Elsevier Academic Press.
- [4] Luck, S.J., Mathalon, D.H., O'Donnell, B.F., Hämäläinen, M.S., Spencer, K.M., Javitt, D. C., & Uhlhaas, P.J. (2011). A Roadmap for the Development and Validation of Event-Related Potential Biomarkers in Schizophrenia Research. *Biological Psychiatry*, 70, 28–34.
- [5] Nitsche, M.A. & Paulus, W. (2001). Sustained excitability elevations induced by transcranial DC motor cortex stimulation in humans. *Neurology*, 57(10), 1899 – 1901.
- [6] Nitsche, M.A., Cohen, L.G., Wassermann, E.M., Priori, A., Lang, N., Antal, A., Paulus, W., Hummel, F., Boggio, P.S., Fregni, F. & Pascual-Leone, A. (2008). Transcranial direct current stimulation: State of the art 2008. *Brain Stimulation*, 1(3), 206-23.
- [7] Hülsdünker T., Ostermann M., Mierau A. Motion-Onset Visual Potentials Evoked in a Sport-Specific Visuomotor Reaction Task// *J Sport Exerc Psychol*. – 2020. – Vol. 14. – P. 1-12.
- [8] Niedermeyer E. Dipole theory and electroencephalography. *Clin Electroencephalogr*. 1996 27(3):121-31
- [9] Nunez P. The dipole layer as a model for scalp potentials. *TIT J Life Sci*. 1977;7(3-4):65-72.

- [10] Hjorth B. Principles for transformation of scalp EEG from potential field into source distribution. *Journal of Clinical Neurophysiology*. 1991; 8:391–396.
- [11] Nunez PL, Pilgreen KL. The spline-Laplacian in clinical neurophysiology: a method to improve EEG spatial resolution. *Journal of Clinical Neurophysiology*. 1991; 8:397–413. [PubMed: 1761706]
- [12] Halassa MM, Sherman SM. Thalamocortical Circuit Motifs: A General Framework. *Neuron*. 2019 Sep 4;103(5):762-770. doi: 10.1016/j.neuron.2019.06.005. PMID: 31487527; PMCID: PMC6886702.
- [13] Kappenmann, E.S., & Luck, S.J. (2012). ERP components: the ups and downs in brainwave recordings. In Kappenmann, E.S. & Luck, S.J (Eds.), *The Oxford handbook of event-related potentials* (pp. 3-30). Oxford: Oxford University Press.
- [14] Kropotov, J. D., Ponomarev, V. A., Kropotova, O. V., Anichkov, A. D., Nechaev V. B. (2000). Human auditory-cortex mechanisms of preattentive sound discrimination. *Neuroscience Letters*, 280, 87–90.
- [15] Makeig, S., Jung, T-P., Ghahremani, D., Bell, A.J., & Sejnowski, T.J. (1997). Blind separation of event-related brain responses into independent components. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94, 10979-10984.
- [16] Onton, J. & Makeig, S. (2006). Information-based modeling of event-related brain dynamics. *Prog Brain Res.*, 159, 99-120.
- [17] Kropotov, J. D., Ponomarev, V. A. (2015). Differentiation of neuronal operations in latent components of event-related potentials in delayed match-to-sample tasks. *Psychophysiology*, 52(6), 826-838.
- [18] MacKay, D. J. (1992). Bayesian model comparison and backprop nets. *Proceedings of the Neural Information Processing Systems*, 4, 839-846.
- [19] Kropotov, J.D. (2016) *Functional neuromarkers for psychiatry*. Amsterdam, London: Elsevier Academic Press

- [20] Brunner, J.F., Hansen, T.I., Olsen, A., Skandsen, T., Haberg, A. & Kropotov, J. (2013). Long-term test-retest reliability of the P3 NoGo wave and two independent components decomposed from the P3 NoGo wave in a visual Go/NoGo task. *International journal of psychophysiology*, 89, 106–114.
- [21] Brunner JF, Olsen A, Aasen IE, Løhaugen GC, Håberg AK, Kropotov J. Neuropsychological parameters indexing executive processes are associated with independent components of ERPs. *Neuropsychologia*. 2015 Jan;66:144-56. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.11.019.
- [22] Kropotov J. D., Mueller A., 2009. What can event related potentials contribute to neuropsychology? *Acta Neuropsychologica*, v.7, #3, 169-181
- [23] КРОПОТОВ Ю.Д., ПРОНИНА М.В., ПОЛЯКОВ Ю.И., ПОНОМАРЕВ В.А. 2013. Биомаркеры в диагностике и лечении психических заболеваний: развитие комплексного подхода Н.П.Бехтеревой *Физиология человека*, Т. 39, №1 С. 14-25
- [24] Maris E, Oostenveld R. Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *J Neurosci Methods*. 2007;164(1):177-190. doi:10.1016/j.jneumeth.2007.03.024
- [25] Oostenveld R, Fries P, Maris E, Schoffelen JM. FieldTrip: Open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Comput Intell Neurosci*. 2011;2011:156869. doi:10.1155/2011/156869
- [26] Kolenda, T., Hansen, L. K., & Larsen, J. (2001). Signal detection using ICA: Application to chat room topic spotting. *Proceedings of the Third International Conference on Independent Component Analysis and Blind Source Separation*, 540-545.
- [27] Yeredor, A. (2010). Blind separation of Gaussian sources with general covariance structures: Bounds and optimal estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58(10), 5057 - 5068.
- [28] Classen, J.; Wolters, A.; Stefan, K.; Wycislo, M.; Sandbrink, F.; Schmidt, A.; Kunesch, E. Chapter 59 Paired associative stimulation. *Suppl. Clin. Neurophysiol*. 2004, 57, 563–569.

- [29] Celnik, P.; Stefan, K.; Hummel, F.; Duque, J.; Classen, J.; Cohen, L.G. Encoding a motor memory in the older adult by action observation. *Neuroimage* 2006, 29, 677–684.
- [30] Rossini, P.M.; Barker, A.T.; Berardelli, A.; Caramia, M.D.; Caruso, G.; Cracco, R.Q.; Dimitrijević, M.R.; Hallett, M.; Katayama, Y.; Lücking, C.H. Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord and roots: Basic principles and procedures for routine clinical application. Report of an IFCN committee. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1994, 91, 79–92.
- [31] Buccino, G.; Binkofski, F.; Fink, G.R.; Fadiga, L.; Fogassi, L.; Gallese, V.; Seitz, R.J.; Zilles, K.; Rizzolatti, G.; Freund, H.J. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: An fMRI study. *Eur. J. Neurosci.* 2001, 13, 400–404.
- [32] Bütefisch, C.M.; Khurana, V.; Kopylev, L.; Cohen, L.G. Enhancing encoding of a motor memory in the primary motor cortex by cortical stimulation. *J. Neurophysiol.* 2004, 91, 2110–2116.
- [33] Stefan, K.; Classen, J.; Celnik, P.; Cohen, L.G. Concurrent action observation modulates practice-induced motor memory formation. *Eur. J. Neurosci.* 2008, 27, 730–738.
- [34] Messina, G.; Zannella, C.; Monda, V.; Dato, A.; Liccardo, D.; De Blasio, S.; Valenzano, A.; Moscatelli, F.; Messina, A.; Cibelli, G.; et al. The Beneficial Effects of Coffee in Human Nutrition. *Biol. Med.* 2015, 7, 1.
- [35] Missitzi, J.; Gentner, R.; Geladas, N.; Politis, P.; Karandreas, N.; Classen, J.; Klissouras, V. Plasticity in human motor cortex is in part genetically determined. *J. Physiol.* 2011, 589, 297–306.
- [36] Celnik, P.; Webster, B.; Glasser, D.M.; Cohen, L.G. Effects of action observation on physical training after stroke. *Stroke* 2008, 39, 1814–1820.
- [37] Chen, R. Intracortical Circuits and Their Interactions. In *Cortical Connectivity*; Springer: Heidelberg, Germany, 2012; p. 65. ISBN 9783642327667.

- [38] Fadiga, L.; Fogassi, L.; Pavesi, G.; Rizzolatti, G. Motor facilitation during action observation: A magnetic stimulation study. *J. Neurophysiol.* 1995, 73, 2608–2611.
- [39] Buccino, G.; Binkofski, F.; Riggio, L. The mirror neuron system and action recognition. *Brain Lang.* 2004, 89, 370–376.
- [40] Barker AJ, Jalinous R, Freeston IL. Non-invasive stimulation of human motor cortex. *Lancet.* 1985, 1106–7.
- [41] Rothwell, J.C.; Thompson, P.D.; Day, B.L.; Boyd, S.; Marsden, C.D. Stimulation of the human motor cortex through the scalp. *Exp. Physiol.* 1991, 76, 159–200.
- [42] Cros, D.; Soto, O.; Chiappa, K.H. Transcranial magnetic stimulation during voluntary action: Directional facilitation of outputs and relationships to force generation. *Brain Res.* 2007, 1185, 103–116.
- [43] Mills, K. R. (1999). *Magnetic stimulation of the human nervous system.* Oxford, UK: Oxford University Press.
- [44] Moscatelli F, Messina A, Valenzano A, Monda V, Salerno M, Sessa F, La Torre E, Tafuri D, Scarinci A, Perrella M, Marsala G, Monda M, Cibelli G, Porro C, Messina G. Transcranial Magnetic Stimulation as a Tool to Investigate Motor Cortex Excitability in Sport. *Brain Sci.* 2021 Mar 28;11(4):432. doi: 10.3390/brainsci11040432.
- [45] Maeda F., Keenan J., Tormos J., Topka H., Pascual-Leone A. Modulation of corticospinal excitability by repetitive transcranial magnetic stimulation // *Clin Neurophysiol.* — 2000. — Vol. 111. — P. 800–5.
- [46] Klooster D. C., de Louw A. J., Aldenkamp A. P., Besseling R. M., Mestrom R. M., Carrette S., et al. Technical aspects of neurostimulation: focus on equipment, electric field modeling, and stimulation protocols // *Neurosci. Biobehav. Rev.* — 2016. — Vol. 65. — P. 113–141.
- [47] Barker A. T., and Shields K. Transcranial magnetic stimulation: basic principles and clinical applications in migraine // *Headache.* — 2017. — Vol. 57. — P. 517–524.

[48] Miniussi C., Harris J. A., and Ruzzoli M. Modelling non-invasive brain stimulation in cognitive neuroscience // *Neurosci. Biobehav. Rev.* — 2013. — Vol. 37. — P. 1702–1712.

[49] Lowe C. J., Vincent C., and Hall P. A. Effects of noninvasive brain stimulation on food cravings and consumption: a meta-analytic review // *Psychosom. Med.* — 2017. — Vol. 79. — P. 2–13.

[50] Lucena M. F. G., Teixeira P. E. P., Bonin Pinto C., and Fregni F. Top 100 cited noninvasive neuromodulation clinical trials // *Expert Rev. Med. Dev.* — 2019. — Vol. 16. — P. 451–466.

[51] Simonetta-Moreau M. Non-invasive brain stimulation (NIBS) and motor recovery after stroke // *Ann Phys Rehabil Med.* — 2014. — Vol. 57. — P. 530–42.

[52] Rossini P. M., Burke D., Chen R., Cohen L. G., Daskalakis Z., Di Iorio R., et al. Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord, roots and peripheral nerves: basic principles and procedures for routine clinical and research application. An updated report from an IFCN committee // *Clin. Neurophysiol.* — 2015. — Vol. 126. — P. 1071–1107.

[53] Valero-Cabré A, Amengual JL, Stengel C, Pascual-Leone A, Coubard OA. Transcranial magnetic stimulation in basic and clinical neuroscience: A comprehensive review of fundamental principles and novel insights. *Neurosci Biobehav Rev.* 2017 Dec;83:381-404. doi: 10.1016/j.neubiorev.2017.10.006. Epub 2017 Oct 13. Erratum in: *Neurosci Biobehav Rev.* 2019 Jan;96:414. PMID: 29032089.

[54] Berardelli A., Inghilleri M., Rothwell J.C., Romeo S., Curra` A., Gilio F., et al. Facilitation of muscle evoked responses after repetitive cortical stimulation in man // *Exp Brain Res.* — 1998. — Vol. 122. — P. 79–84.

[55] Modugno N., Nakamura Y., MacKinnon C.D., et al. Motor cortex excitability following short trains of repetitive magnetic stimuli // *Exp Brain Res.* — 2001. — Vol. 140. — P. 453–9.

[56] Samii A., Wassermann E.M., Ikoma K., Mercuri B., Hallett M. Characterization of postexercise facilitation and depression of motor evoked potentials to transcranial magnetic stimulation // *Neurology*. — 1996. — Vol. 46. — P. 1376–82.

[57] Kropotov, J.D. (2016) *Functional neuromarkers for psychiatry*. Amsterdam, London: Elsevier Academic Press

[58] Jung TP, Makeig S, Westerfield M, Townsend J, Courchesne E, Sejnowski TJ. Removal of eye activity artifacts from visual event-related potentials in normal and clinical subjects. *Clin Neurophysiol*. 2000;111(10):1745-1758. doi:10.1016/s1388-2457(00)00386-2

[59] Wiener, N. (1948). *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge: MIT Press.

[60] Anokhin, P.K. (1935). The problem of the center and periphery in the physiology of nervous activity. *Gorky*, 9-70

[61] Vasilevsky, N. (1973). Adaptive self-control functions and its relationship with the dynamic control of the endogenous biorhythms. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 9 (4), 374-382.

[62] Kamiya, J. (1968). Conscious control of brain waves. *Psychology Today*, 1, 56-60.

[63] Birbaumer, N., Elbert, T., Canavan, A. & Rockstroh, B. (1990). Slow potentials of the cerebral cortex and behavior. *Physiological Reviews*, 70, 1-41.

[64] John, E. R. (1990). Principles of Neurometrics. *American Journal of EEG Technology*, 30, 251-266.

[65] Kropotov, J.D., Grin-Yatsenko, V.A., Ponomarev, V.A., Chutko, L.S., Yakovenko, E.A. & Nikishina, I.S. (2005). ERPs correlates of EEG relative beta training in ADHD children. *International Journal of Psychophysiology*, 55, 23–34.

Библиографические данные

УДК 61:796/799

Ключевые слова: спортсмены, потенциалы, связанные с событиями, электроэнцефалография, ритмы ЭЭГ, ТМС, биологическая обратная связь.

Список исполнителей

Федеральное медико-биологическое агентство

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научно-клинический центр спортивной медицины и реабилитации Федерального медико-биологического агентства»
(ФГБУ ФНКЦСМ ФМБА РОССИИ)

Индивидуально-ориентированные технологии визуализации и модуляции функционального состояния головного мозга у спортсменов спортивных сборных команд российской федерации с учетом специфики вида спорта, спортивной квалификации и половозрастных особенностей

Методические рекомендации

МР ФМБА России _____ - 2024

Директор

А.В. Жолинский

Начальник организационно-исследовательского отдела

В.С. Фещенко

Руководитель работы, ведущий научный сотрудник

И.Н. Митин

Исполнители:

Ответственный исполнитель по теме, врач по спортивной медицине

В.В. Завьялов