

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СПОРТА

ЭРГОГЕННЫЙ ЭФФЕКТ ТРАНСКРАНИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ В СПОРТЕ (систематический обзор зарубежной литературы)

Е.В. АГЕЕВ,
НГУ им. П.Ф. Лесгафта,
ФГУ СПбНИИФК,
г. Санкт-Петербург;
Т.А. СЕЛИТРЕНИКОВА,
НГУ им. П.Ф. Лесгафта,
г. Санкт-Петербург;
Я.В. ГОЛУБ,
ФГУ СПбНИИФК,
ВМедА, г. Санкт-Петербург

Аннотация

Физическая работоспособность (ФР) является одним из главных компонентов, определяющих результативность спортсмена, поэтому исследование новых технологий, позволяющих улучшить данный показатель, является актуальным направлением для современной спортивной науки. Транскраниальная электростимуляция постоянным током (ТЭС_{пт}) является перспективным методом для улучшения ФР, однако вопрос о его эффективности все еще остается противоречивым. Целью данного обзора было – на основе современного всестороннего обзора зарубежной научно-методической литературы актуализировать данные об эффективности влияния ТЭС_{пт} на ФР в спорте. В результате были отобраны 24 обзорные статьи и метаанализы, посвященные цели исследования. Данный обзор демонстрирует неоднозначные выводы исследователей в отношении эффективности ТЭС_{пт}. Так, в работах, посвященных влиянию ТЭС_{пт} на максимальную силу и общую выносливость, приводятся противоречивые результаты. В свою очередь на силовую выносливость, выполнение упражнений «до отказа» и решение сенсомоторных задач показана высокая эффективность. В отдельных работах сообщается об эффективности метода при выполнении специфических для спорта задач. Хотя в исследованиях, включенных в обзор, показано, что механизмы, обуславливающие влияние данного метода, до сих пор полностью не ясны, а специалисты сообщают о большом разнообразии протоколов и методологических неточностях, представляющих трудности для интерпретации, ТЭС_{пт} показывает свою перспективность для улучшения ФР в спорте.

Ключевые слова: нейростимуляция, научный обзор, ТЭС, tDCS, нейротехнологии, физическая работоспособность, спортивная подготовка.

ERGOGENIC EFFECT OF TRANSCRANIAL DIRECT CURRENT ELECTRICAL STIMULATION IN SPORTS (systematic review of foreign literature)

E.V. AGEEV,
Lesgaft University, FSI SPbNIIFK,
St. Petersburg city;
T.A. SELITRENKOVA,
Lesgaft University, St. Petersburg city;
Ya.V. GOLUB,
FSI SPbNIIFK, VMedA, St. Petersburg city



Abstract

Physical performance (PP) is one of the main components that determine the performance of an athlete, therefore, the study of new technologies that can improve this indicator is an urgent direction for modern sports science. Transcranial direct current electrical stimulation (tDCS) is a promising method for improving PP, but the question of its effectiveness is still controversial. The purpose of this review was, based on a modern comprehensive review of foreign scientific and methodological literature, to update data on the effectiveness of the influence of tDCS on PP in sports. As a result, 24 review articles and meta-analyses devoted to the purpose of the study were selected. This review demonstrates that researchers come to ambiguous conclusions regarding the effectiveness of tDCS. Thus, in the works devoted to the effect of tDCS on maximum strength and overall endurance, contradictory results are given. In turn, high efficiency has been shown for strength endurance, performing exercises to failure and solving sensorimotor tasks. Some papers report on the effectiveness of the method in performing sports-specific tasks. Although the studies included in the review show that the mechanisms causing the effect of this method are still not completely clear, and experts report a wide variety of protocols and methodological inaccuracies that present difficulties for interpretation, tDCS shows its promise for improving PP in sports.

Keywords: neurostimulation, scientific review, TES, tDCS, neurotechnology, physical performance, sports training.

Введение

Поиск эффективных, безопасных, экономически и научно обоснованных методов улучшения физической работоспособности (ФР) всегда был актуальным направлением для специалистов в области спорта. Мозг является центральным регулятором при выполнении двигательных действий [2, 3], и поэтому современные технологии нейростимуляции представляются многообещающим инструментом для улучшения ФР.

В последние десятилетия наблюдается возросший интерес со стороны зарубежных исследователей к одному из методов нейростимуляции – транскраниальной электростимуляции постоянным током (ТЭС_{пт}). Публикуется большое количество работ, среди которых всё чаще встречаются исследования, посвященные влиянию этого метода на ФР.

Метод ТЭС_{пт} предполагает воздействие постоянного тока малой силы (до 2 мА) через относительно большие (чаще 25 × 25 см²) электроды, располагаемые на коже головы над целевыми областями головного мозга [23]. Механизм действия ТЭС_{пт} до сих пор полностью не ясен [7], однако принято считать [7, 13, 22], что физиологический эффект основан на подпороговом сдвиге мембранного потенциала в сторону изменения поляризации нейрона в зависимости от полярности электродов. В месте наложения анода происходит сдвиг мембранного потенциала в сторону деполяризации, в то время как в месте катода, напротив – сдвиг в сторону гиперполяризации. Физиологические механизмы ТЭС_{пт}, обуславливающие ФР, более подробно будут обсуждаться далее.

В отечественной литературе встречается весьма ограниченное число публикаций, посвященных исследованию влияния ТЭС_{пт} на ФР. В нашей стране данный метод в основном используется в клинической практике под терминами «микрополяризация» или «гальванизация». Основной массив исследований по данному направлению проводится за рубежом. Несмотря на растущее число публикаций, среди специалистов еще не сформировалось единого мнения об эффективности влияния ТЭС_{пт} на ФР в спорте [4, 9, 22]. Данный факт послужил предпосылкой для настоящего обзора.

Цель исследования: на основе современного обзора зарубежной научно-методической литературы актуализировать данные об эффективности влияния ТЭС_{пт} на физическую работоспособность в спорте.

Материалы и методы исследования

Данный систематический обзор был выполнен в соответствии с заявлением о предпочтительных элементах отчетности для систематических обзоров и метаанализов (PRISMA). Поиск литературы был проведен в период с 1 по 30 ноября 2023 г. в таких базах данных, как: PubMed, Google Scholar, Web of Science. Предварительный анализ выявил большое количество работ, посвященных изучению ТЭС_{пт} в данной области. И чтобы обеспечить максимально полный и актуальный обзор, для наибольшего охвата исследований было принято решение включить только научные работы и метаанализы, опубликованные за последние 5 лет.

Критерием включения статей были обзорные статьи и метаанализы, опубликованные в период 2018–2023 гг., в которых изучалось воздействие ТЭС_{пт} на ФР. Участники: спортсмены, а также здоровые мужчины и женщины. Вид воздействия: однократная или курсовая ТЭС_{пт}. Сила тока варьировалась от 0,5 до 2 мА; время воздействия – от 5 до 60 мин. Изучалось влияние «онлайн» (в момент) и «офлайн» (после) стимуляции на различные области коры головного мозга. Тезисы докладов конференций, авторефераты, главы книг и статьи, опубликованные в журналах, не прошедших рецензирование, не были включены в обзор. Кроме того, исследования, в которых использовалась ТЭС_{пт} в сочетании с другими методами, также были исключены.

Наш анализ был ограничен исследованиями, опубликованными на английском языке. Поиск запросы определились в соответствии с целью исследования; никакие фильтры не применялись. Для поиска использовались следующие слова или словосочетания: “transcranial direct current stimulation”, “tDCS”, “sport”, “athletic performance”, “power” “endurance”. Помимо этого, проводился дополнительный поиск статей «вручную» с целью подбора подходящих публикаций, не выявленных первоначальной стратегией поиска.



В обзоре рассматривались следующие компоненты ФР: максимальная сила, общая выносливость, силовая

выносливость, сенсомоторные реакции, выполнение упражнений «до отказа».

Результаты работы и их обсуждение

Полная процедура отбора статей представлена на рис. 1. В результате поиска всего найдено 1038 статей. После удаления дублирующих статей (258) осталось 780. Из оставшегося объема еще были удалены статьи по причинам: 478 – по названию и/или аннотации; 216 – являлись отдельными исследованиями; 22 обзор-ные статьи и метаанализы – по названию и/или анно-

тации; 40 обзорных статей и метаанализов не отвечали цели исследования.

Итог поиска – 24 обзора и метаанализа. Окончательный результат включенных исследований представлен в табл. 1. В общей сложности во всех работах, включенных в обзор, было проанализировано порядка 500 статей с общим количеством участников более 12 000 чел.

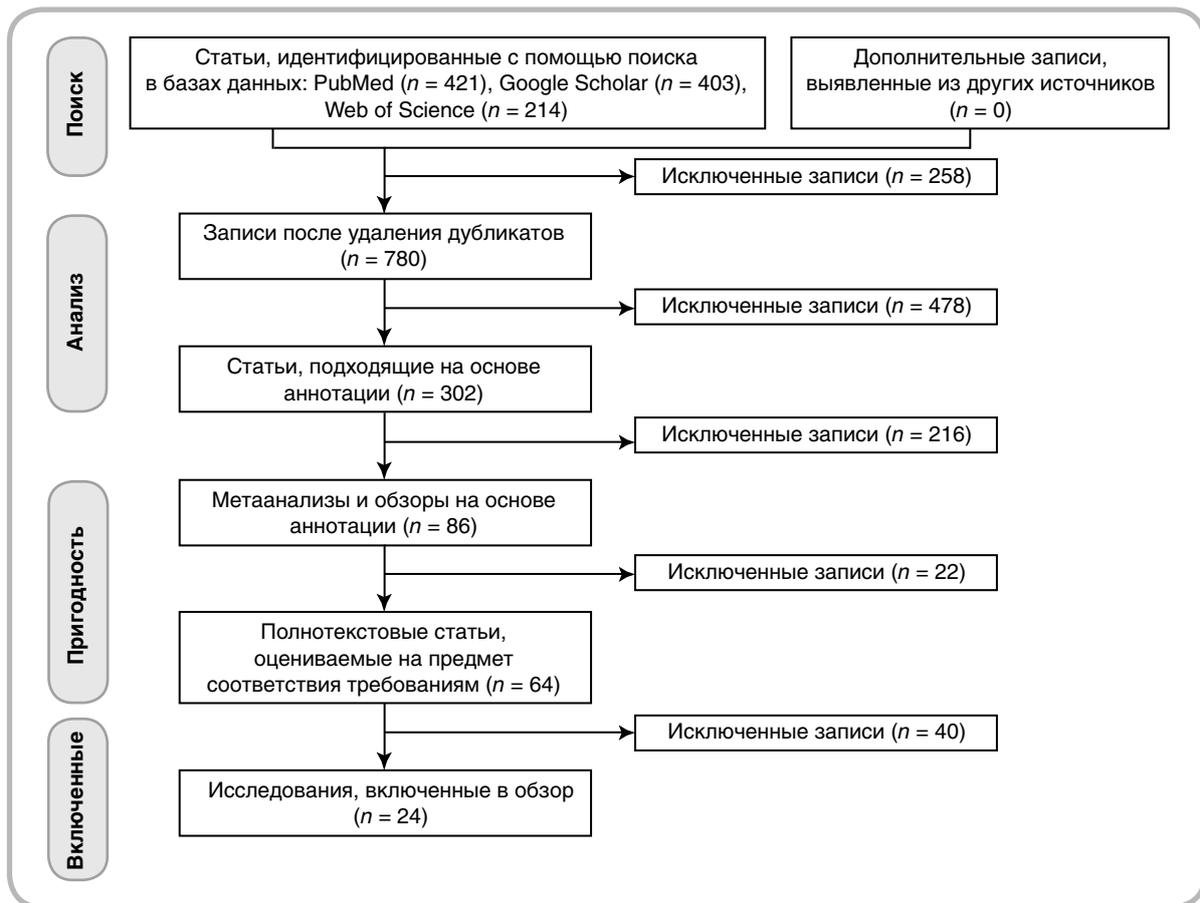


Рис. 1. Блок-схема результатов поисковой стратегии

Проведенный обзор содержит ценные резюме исследований, которые позволили более критически и всесторонне оценить влияние ТЭС_{пт} на ФР.

В исследованиях, изучающих влияние ТЭС_{пт} на максимальную силу, приводятся противоречивые результаты, сообщающие о высокой [8, 17], умеренной [1, 3, 12] и низкой (отсутствии) [11, 13, 16, 18] эффективности. Схожие результаты получены при изучении влияния метода на общую выносливость. В этих работах также сообщается о высокой [16], умеренной [3, 19, 22] и низкой (отсутствии) [8, 17] эффективности.

В отношении силовой выносливости [3, 12, 13, 19, 22] и способности к выполнению упражнений «до отказа» [1, 3, 13, 27] большинство ученых приходят к выводу об эффективности применения ТЭС_{пт}. Одним из возможных объяснений таких результатов является уменьшение вос-

принимаемой нагрузки. В работах, посвященных этой теме [4, 11, 27], показано уменьшение субъективного восприятия выполняемой нагрузки.

Положительный эффект ТЭС_{пт} также показан при выполнении сенсомоторных задач [8, 24, 30], выражающийся в сокращении времени их решения. Patel R., et al. [25] отмечают, что многие исследования демонстрируют сокращение времени выполнения сенсомоторных задач, однако большинство из них не удается анализировать из-за наличия в статьях методологических проблем или неточностей.

Отдельные обзоры показывают эффективность ТЭС_{пт} для улучшения ФР верхних [24] и нижних конечностей [29, 30]. Вместе с тем Alix-Fages C., et al. [1] отмечали более выраженное воздействие ТЭС_{пт} во время выполнения глобальных, нежели локальных упражнений.



Таблица 1

**Включенные обзорные статьи и метаанализы ($n = 24$),
изучающие влияние ТЭС_{пт} на физическую работоспособность**

| Источник | Влияние ТЭС _{пт} | Краткий вывод обзора/метаанализа |
|------------------------------------|--|---|
| Alix-Fages C., et al. [1] | На выполнение УДО и МС | Наблюдается небольшое улучшение МС и умеренная эффективность при выполнении УДО |
| Angius L., et al. [3] | На ФР | ТЭС _{пт} обладает высоким потенциалом для улучшения ФР |
| Baharlouei H., et al. [4] | На восприятие физической нагрузки | ТЭС _{пт} является эффективным методом для уменьшения оценки воспринимаемой нагрузки |
| Chinzara T.T. [8] | На СМР, МС и ОВ | Выявлено более значимое влияние на МС и СМР, чем на ОВ |
| Friehs M.A., et al. [9] | На результативность в олимпийских видах спорта | Отсутствие единой методологии мешают сформулировать выводы об эффективности ТЭС _{пт} в олимпийских видах спорта |
| Halakoo S., et al. [10] | На обучение и ФР (сравнение одно- и двусторонней ТЭС _{пт}) | Двусторонняя ТЭС _{пт} более эффективна для обучения двигательных навыков и улучшения ФР у здоровых людей |
| Holgado D., et al. [11] | На субъективные и объективные показатели ФР | ТЭС _{пт} оказывает положительный эффект на ФР, однако он невелик и, вероятно, определен низким качеством исследований |
| Shyamali Kaushalya F., et al. [12] | На показатели силы (однократный сеанс) | Наблюдается небольшое улучшение МС и значительное улучшение СВ |
| Lattari E., et al. [13] | На тренировки с отягощением | ТЭС _{пт} ПФК _{дл} увеличивает тренировочный объем в силовых упражнениях, но не МС |
| Lattari E., et al. [14] | На легальность применения в спорте | Сегодня нет единого мнения об отнесении ТЭС _{пт} к допингу. Применение не регламентировано |
| Lavazza A. [15] | На спортивный результат | ТЭС _{пт} улучшает обучение двигательным действиям. Влияния на ФР противоречиво |
| Lefaucheur J.P. [16] | На МС и ОВ | ТЭС _{пт} не влияет на МС, но эффективна для улучшения ОВ |
| Li Z., et al. [17] | На МС и ОВ | ТЭС _{пт} является эффективным средством для улучшения МС, но не ОВ |
| Machado DGDS, et al. [18] | На ФР | ТЭС _{пт} М1 улучшает выполнение УДО. Не обнаружено существенного влияния ТЭС _{пт} на силовые показатели |
| Machado S., et al. [19] | На ФР (однократный сеанс) | Выявлено положительное влияние на СВ, умеренное на ОВ и противоречивое на МС |
| Marinus N., et al. [20] | На спортивный результат (однократный сеанс) | Одноактная ТЭС _{пт} М1 может привести к повышению ФР при выполнении специфических для спорта задач |
| Maudrich T., et al. [21] | На МС и ОВ | Показано противоречивое влияние на МС и ОВ. Вероятно, ОВ является лучшей целью для ТЭС _{пт} |
| Meesen R., et al. [22] | На модуляцию работы моторной коры | ТЭС _{пт} является перспективным методом для улучшения ФР |
| Nikolin, S., et al. [24] | На ФР верхних конечностей | ТЭС _{пт} улучшает время реакции, время выполнения заданий и их точности |
| Patel R., et al. [25] | На МС и ОВ | Проблема множества монтажей не позволяет валидно оценить влияние ТЭС _{пт} на МС и ОВ |
| Schmaußer, M., et al. [27] | На ФР при езде на велосипеде и беге (однократный сеанс) | ТЭС _{пт} улучшает результат бега и езды на велосипеде при выполнении УДО за счет снижения оценки воспринимаемой нагрузки |
| Wang B., et al. [28] | На ФР (при сочетании с физической тренировкой) | ТЭС _{пт} в сочетании с физическими упражнениями повышает ФР и эффективность обучения двигательным действиям |
| Xiao S., et al. [29] | На ФР голеностопного сустава и стопы | Улучшение ФР стопы и голеностопного сустава, включая тактильное восприятие и др. свойства |
| Yu C., et al. [30] | На СМК нижних конечностей | ТЭС _{пт} улучшает СМК нижних конечностей, время выполнения заданий и скорость движения |

Примечание: УДО – упражнение «до отказа»; М1 – первичная моторная кора; МС – максимальная сила; СМР – сенсомоторные реакции; ОВ – общая выносливость; ПФК_{дл} – дорсолатеральная префронтальная кора; СВ – силовая выносливость; СМК – сенсомоторный контроль; ФР – физическая работоспособность.



Во многих работах показана противоречивость результатов в отношении эффективности ТЭС_{пт} на ФР [9, 11, 21, 25]. Например, метаанализ Holgado D., et al. [11] выявил лишь небольшой положительный эффект ТЭС_{пт} на ФР, а имеющиеся высокие результаты авторы предлагают рассматривать как предвзятость исследователей.

Напротив, другие исследования [13, 14, 15, 20] демонстрируют, что ТЭС_{пт} является перспективным методом в спорте. Показано, что метод может быть эффективен при работе с отягощением [13], а также выполнении специфических для спорта задач (например, у скалолазов, гребцов, велосипедистов, бодибилдинге, в игровых видах спорта, единоборствах и т.д.). Отмечается, что для одних видов спортивных задач может не наблюдаться никакого эффекта, в то время как для других может проявляться выраженный эффект [15]. Важное значение при выраженности эффектов ТЭС_{пт} имеет спортивная квалификация. Как отмечается в некоторых обзорах [15, 19, 20], у более опытных спортсменов при воздействии на определенные компоненты ФР может наблюдаться эффект «потолка», не позволяющий демонстрировать какие-либо дальнейшие эффекты ТЭС_{пт}.

Одельного внимания заслуживает синергетическое применение ТЭС_{пт} и физических упражнений. Обзор Wang B., et al. [28] показал положительное кумулятивное влияние на ФР и обучение двигательным действиям. Такие результаты открывают дополнительное направление для будущих исследований, а именно – кумулятивное применение ТЭС_{пт} и педагогических методик для решения различных задач в спорте.

В данный обзор не были включены исследования, посвященные влиянию ТЭС_{пт} на функции равновесия. Хотя существуют работы, в которых констатируется эффективность применения ТЭС_{пт} для этого качества [5, 6], участниками таких исследований в большинстве случаев являются пожилые люди, либо лица в период реабилитации, а не спортсмены. Эффект ТЭС_{пт} в таких статьях может быть обусловлен другими нейробиологическими механизмами, поэтому в будущем необходимо экспериментальное подтверждение эффективности метода у спортсменов, учитывая специфические особенности их деятельности.

Такое разнообразие полученных результатов мы, как и большинство специалистов в данной области, объясняем тем, что на сегодняшний день не сформулировано единой физиологической парадигмы, обуславливающей влияние ТЭС_{пт} на ФР [3, 10, 18, 24, 25]. Одной из проблем в данной области является большое многообразие протоколов стимуляции. Как показывают проанализированные работы, наиболее распространенными целевыми областями для ТЭС_{пт} являются: первичная моторная кора (М1) и дорсолатеральная префронтальная кора (ПФК_{дл}).

При ТЭС_{пт} М1 улучшение ФР часто связывают с повышением кортикоспинальной возбудимости [3, 18, 20, 22] и уменьшением внутрикоркового торможения [18, 22]. Предполагается, что ТЭС_{пт} каким-то образом облег-

чает деятельность М1, увеличивая работу нисходящего моторного тракта во время выполнения физических упражнений, отдавая утомление [22, 24]. Еще одним возможным механизмом ТЭС_{пт} М1 может быть модуляция восприятия боли [4, 16, 27]. Этот механизм всё еще не ясен. Моруа Е., et al. [23] пишут, что возможной причиной влияния М1 на модуляцию боли может быть ее связь с островковой корой и таламусом, как было продемонстрировано в исследованиях на животных. В связи с этим предполагается, что боль, вызванная физической нагрузкой, играет фундаментальную роль в регуляции ФР, где люди с лучшей способностью переносить боль будут более успешными [27]. Chinzara T.T. [8] было высказано предположение, что обратная афферентация играет определенную роль в модуляции восприятия усилий и оказывает большое влияние на производительность в тех задачах, которые требуют длительных субмаксимальных усилий (вплоть до отказа).

При стимуляции ПФК_{дл} показано [7], что, находясь на иерархической вершине нервной системы, она напрямую или опосредованно участвует в обработке внутренних и внешних сигналов, связанных с выполняемым двигательным действием. Отмечается [3, 4, 12, 13, 27], что стимуляция ПФК_{дл} может влиять на мотивационную функцию и когнитивный контроль, подавляя периферические сигналы усталости, снижающие восприятие усилий и, следовательно, позволяя продолжать выполнение работы. Также в своем обзоре Angius L., et al. [3] отмечают, что перед началом утомления наблюдается снижение насыщения ПФК_{дл} кислородом и ТЭС_{пт}, вероятно, может усилить способность данной области игнорировать interoцептивные сигналы, тем самым задерживая отказ от выполнения двигательной задачи.

Помимо рассмотренных областей, другими целевыми областями для ТЭС_{пт} являются: поясная [17] и лобная извилина [3], мозжечок [12], премоторная [22], височная [3, 26] и зрительная [9, 15] кора, а также других областей головного мозга [3, 15, 28].

Например, при ТЭС_{пт} височной коры [3, 26] предполагается влияние на островковую кору, которая принимает одно из центральных участия в вегетативной регуляции деятельности сердца. Schmaußer M., et al. [27] отмечают, что компьютерное моделирование и экспериментальные исследования показали, что ТЭС_{пт} левой височной коры изменяет активность островковой коры и приводит к усилению парасимпатической модуляции в покое и во время физических нагрузок.

Однако имеет место несоответствие относительно вышеописанных гипотез, т.к. многие исследования сообщали об увеличении одних и тех же компонентов ФР после ТЭС_{пт} различных областей мозга [21, 25]. Одним из возможных объяснений такой неоднородности эффектов является то, что выполнение физических упражнений является само по себе сложным процессом, в регуляции которого задействованы многие области мозга. Также из-за различий в протоколах стимуляции



(размер и положение электрода, сила и мощность тока, время стимуляции, количество сеансов) при низкой фокальности ТЭС_{пт} ток может irradiровать на другие области мозга за пределами целевой области, тем самым влияя на результаты [3, 21]. Помимо этого, доказана нелинейная зависимость доза-эффекта между ТЭС_{пт} и индуцированными изменениями кортикоспинальной возбудимости, где ряд исследований показывает [1, 18, 21], что анод может снижать, а катод, наоборот, повышать кортикоспинальную возбудимость.

Таким образом, основными проблемами в исследованиях, посвященных влиянию ТЭС_{пт} на ФР являются: большая вариативность и неточность протоколов экспериментов, неравномерность количественных показателей и другие методологические несоответствия [1, 3, 4, 9, 27, 21, 25].

Малое количество работ рассматривает сохранение эффекта от стимуляции. Актуальным также является вопрос о снижении ФР при использовании ТЭС_{пт}. Генетика, пол, возраст, функциональное состояние и уровень спортивного мастерства также оказывают влияние на эффективность использования ТЭС_{пт} [3, 9, 19, 25], что также может объяснять противоречивость, наблюдаемую в исследованиях. Неясность механизмов, лежащих в основе эргогенного эффекта ТЭС_{пт}, предполагает большую осторожность при интерпретации результатов, поскольку лишь небольшое количество исследований использует методы оценки физиологических характеристик активности мозга, такие как электроэнцефалограмма, позитронно-эмиссионная томография, функциональная магнитно-резонансная томография, ближняя инфракрасная спектроскопия [1].

Всё вышесказанное приводит к выводу о том, что существует множество переменных, которые могут оказывать влияние на эффективность ФР при использовании ТЭС_{пт}. Machado DGDS, et al. [18] было подсчитано, что с учетом расположения электродов, их размера, количества, плотности тока, полярности, времени стимуляции, числа сеансов, функционального состояния существует от 4 млн до 8 трлн индивидуальных протоколов, которые могут быть реализованы.

Одним из перспективных методов модификации ТЭС_{пт}, зарекомендовавших себя в последние годы, является применение ТЭС_{пт} с высоким разрешением [1, 4, 11, 24, 27, 30]. Хотя этот метод предполагает решение некоторых проблем, связанных с ТЭС_{пт} (например, более высокую фокальность), еще рано говорить о его большей эффективности в контексте повышения ФР [1]. Дальнейшие исследования должны ответить на многие вопросы в отношении эффективности данного метода.

Во всех работах, включенных в данный обзор, демонстрируется отсутствие побочных эффектов как в корот-

ких, так и лонгитюдных исследованиях при использовании ТЭС_{пт}. Это соотносится с выводами обширного обзора Nikolin S., et al. [24], целью которого было исследование безопасности ТЭС_{пт}. Несмотря на безопасность данного метода, было замечено [3, 23, 16], что существует проблема бесконтрольного применения ТЭС_{пт}. В поисках улучшения своих результатов спортсмены могут менять протоколы (например, устанавливать другие монтажи и увеличивать время стимуляции) или злоупотреблять методом. Отсутствие достаточной доказательной базы может не только потенциально снизить результативность спортсмена, но и навредить его здоровью. В связи с этим рекомендуется применять лишь изученные протоколы, показавшие свою безопасность и эффективность, понимая, что у любого организма, как и у любого метода есть свои пределы, переходя через которые нарушается функционирование всей системы.

Несмотря на представленные эффекты влияния ТЭС_{пт} на ФР, еще не сформулировано единого мнения о принадлежности методов нейростимуляции (в том числе ТЭС_{пт}) к списку запрещенных средств в спорте. В своей статье Lavazza A. [15] показал, что эффективность данного метода всё еще остается спорной, однако ТЭС_{пт}, по-видимому, имеет большой потенциал для применения в спорте. Стандартизация подходов к изучению ТЭС_{пт}, а также понимание механизмов работы позволяют определить легальность использования метода в спорте. Данный вопрос остается предметом дискуссий и должен рассматриваться в будущих исследованиях.

Заключение

Данный обзор демонстрирует, что ТЭС_{пт} всё чаще применяется в спорте для улучшения ФР. При этом в отношении эффективности метода исследователи приходят к неоднозначным выводам. Так, в работах, посвященных влиянию ТЭС_{пт} на максимальную силу и общую выносливость, приводятся противоречивые результаты. В свою очередь на силовую выносливость, выполнение упражнений «до отказа» и сенсомоторных задач показана высокая эффективность. Помимо этого, сообщается об эффективности ТЭС_{пт} при выполнении специфических для спорта задач.

Хотя в исследованиях, включенных в обзор, показано, что механизмы, обуславливающие влияние данного метода до сих пор полностью не ясны, а специалисты сообщают о большом разнообразии протоколов и методологических неточностях, представляющих трудности для интерпретации, ТЭС_{пт} показывает свою перспективность для улучшения ФР в спорте. Решение вышеописанных проблем в будущем позволит определить весь потенциал ТЭС_{пт} в спортивной практике.



Литература / References

1. Alix-Fages, C., Romero-Arenas, S., Castro-Alonso, M., Colomer-Poveda, D., Río-Rodríguez, D., Jerez-Martínez, A. and Márquez, G. (2019), Short-term effects of anodal transcranial direct current stimulation on endurance and maximal force production: a systematic review and meta-analysis, *Journal of clinical medicine*, vol. 8, no 4, p. 536.
2. Aly, M.A., Ahmed, M., Hasan, A., Kojima, H. and R. Abdelhakem, A. (2019), Sport experience and physical activity: Event-related brain potential and task performance indices of attention in young adults, *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, vol. 4, no. 2, p. 33.
3. Angius, L., Pascual-Leone, A. and Santarnecchi, E. (2018), Brain stimulation and physical performance, *Progress in brain research*, vol. 240, pp. 317–339.
4. Baharlouei, H., Saba, M.A., Yazdi, M.J.S. and Jaberzadeh, S. (2020), The effect of transcranial direct current stimulation on balance in healthy young and older adults: A systematic review of the literature, *Neurophysiologie Clinique*, vol. 50, no. 2, pp. 119–131.
5. Baharlouei, H., Gooshe, M., Moore, M., Ahmadi, A.R., Yassin, M. and Jaberzadeh, S. (2024), The Effect of Transcranial Direct Current Stimulation on Rating of Perceived Exertion: A Systematic Review of The Literature, *Psychophysiology*, vol. 4, iss. 6, [Online] URL: <https://doi.org/10.1111/psyp.14520>
6. Behrangrad, S., Zoghi, M., Kidgell, D. and Jaberzadeh, S. (2021), The effect of a single session of non-invasive brain stimulation on balance in healthy individuals: a systematic review and best evidence synthesis, *Brain Connectivity*, vol. 11, no. 9, pp. 695–716.
7. Chan, M.M., Yau, S.S. and Han, Y.M. (2021), The neurobiology of prePPontal transcranial direct current stimulation (tDCS) in promoting brain plasticity: A systematic review and meta-analyses of human and rodent studies, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 125, pp. 392–416.
8. Chinzara, T.T., Buckingham, G. and Harris, D.J. (2022), Transcranial direct current stimulation and sporting performance: A systematic review and meta-analysis of transcranial direct current stimulation effects on physical endurance, muscular strength and visuomotor skills, *European Journal of Neuroscience*, vol. 55, no. 2, pp. 468–486.
9. Friehs, M.A., Whelan, E., Guldenpenning, I., Krause, D. and Weigelt, M. (2022), Stimulating performance: A scoping review on transcranial electrical stimulation effects on Olympic sports, *Psychology of Sport and Exercise*, vol. 59, pp. 102–130.
10. Halakoo, S., Ehsani, F., Hosnian, M., Zoghi, M. and Jaberzadeh, S. (2020), The comparative effects of unilateral and bilateral transcranial direct current stimulation on motor learning and motor performance: A systematic review of literature and meta-analysis, *Journal of Clinical Neuroscience*, vol. 72, pp. 8–14.
11. Holgado, D., Vadillo, M.A. and Sanabria, D. (2019), The effects of transcranial direct current stimulation on objective and subjective indexes of exercise performance: A systematic review and meta-analysis, *Brain Stimulation*, vol. 12, no. 2, pp. 242–250.
12. Shyamali Kaushalya, F., Romero-Arenas, S., García-Ramos, A., Colomer-Poveda, D. and Marquez, G. (2022), Acute effects of transcranial direct current stimulation on cycling and running performance. A systematic review and meta-analysis, *European journal of sport science*, vol. 22, no. 2, pp. 113–125.
13. Lattari, E., Oliveira, B.R., Monteiro Junior, R.S., Marques Neto, S.R., Oliveira, A.J., Maranhao Neto, G.A. and Budde, H. (2018), Acute effects of single dose transcranial direct current stimulation on muscle strength: A systematic review and meta-analysis, *PLoS One*, vol. 13, no. 12, p.e0209513, [Online] URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209513>
14. Lattari, E., Oliveira, B.R.R. and Márquez, G. (2022), Acute Effects of Anodal Transcranial Direct Current Stimulation in Resistance and Power Exercises: A Brief Review for Coaches and Practitioners, *Strength and Conditioning Journal*, vol. 44, no. 5, pp. 57–68.
15. Lavazza, A. (2019). Transcranial electrical stimulation for human enhancement and the risk of inequality: Prohibition or compensation? *Bioethics*, vol. 33, no. 1, pp. 122–131.
16. Lefaucheur, J.P. (2019), Boosting physical exercise with cortical stimulation or brain doping using tDCS: Fact or myth? *Neurophysiologie Clinique*, vol. 49, no. 2, pp. 95–98.
17. Li, Z., Wu, C., Gu, X. and He, Y. (2021), Effects of transcranial direct current stimulation on muscle strength and endurance performance in healthy adults: a systematic review and meta-analysis, *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, vol. 25, no. 29, pp. 47–50.
18. Machado, DGDS, Unal, G., Andrade, S.M., Moreira, A., Altimari, L.R., Brunoni, A.R. and Okano, A.H. (2019), Effect of transcranial direct current stimulation on exercise performance: a systematic review and meta-analysis, *Brain Stimulation*, vol. 12, no. 3, pp. 593–605.
19. Machado, S., Jansen, P., Almeida, V. and Veldema, J. (2019), Is tDCS an adjunct ergogenic resource for improving muscular strength and endurance performance? A systematic review, *Frontiers in psychology*, vol. 10, pp. 11–27.
20. Marinus, N., Van Hoornweder, S., Aarts, M., Vanbilsen, J., Hansen, D. and Meesen, R. (2023), The influence of a single transcranial direct current stimulation session on physical fitness in healthy subjects: a systematic review, *Experimental Brain Research*, vol. 241, no. 1, pp. 31–47.
21. Maudrich, T., Ragert, P., Perrey, S. and Kenville, R. (2022), Single-session anodal transcranial direct current stimulation to enhance sport-specific performance in athletes: A systematic review and meta-analysis, *Brain Stimulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1517–1529.
22. Meesen, R., Van Hoornweder, S., Marinus, N. and Hansen, D. (2021), The effect of single-session transcranial direct current stimulation (tDCS) on the three core components of physical fitness: muscle strength, muscle endurance and cardiopulmonary endurance, a systematic review. *Brain Stimulation: Basic, Translational, and Clinical Research in Neuromodulation*, vol. 14, no. 6, p. 16–32.



23. Morya, E., Monte-Silva, K., Bikson, M., Esmaeilpour, Z., Biazoli, C.E., Fonseca, A. and Okano, A.H. (2019), Beyond the target area: an integrative view of tDCS-induced motor cortex modulation in patients and athletes, *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 16, no. 1, pp. 1–29.
24. Nikolin, S., Huggins, C., Martin, D., Alonzo, A. and Loo, C.K. (2018), Safety of repeated sessions of transcranial direct current stimulation: a systematic review, *Brain stimulation*, vol. 11, no. 2, pp. 278–288.
25. Patel, R., Ashcroft, J., Patel, A., Ashrafian, H., Woods, A.J., Singh, H. and Leff, D.R. (2019), The impact of transcranial direct current stimulation on upper-limb motor performance in healthy adults: a systematic review and meta-analysis, *Frontiers in Neuroscience*, vol. 13, pp. 12–13, [Online] URL: <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01213>
26. Savoury, R., Kibele, A. and Behm, D.G. (2022), Methodological issues with transcranial direct current stimulation for enhancing muscle strength and endurance: a narrative review, *Journal of Cognitive Enhancement*, vol. 6, no. 1, pp. 114–125.
27. Schmaußer, M., Hoffmann, S., Raab, M. and Laborde, S. (2022), The effects of noninvasive brain stimulation on heart rate and heart rate variability: A systematic review and meta-analysis, *Journal of Neuroscience Research*, vol. 100, no. 9, pp. 1664–1694.
28. Wang, B., Xiao, S., Yu, C., Zhou, J. and Fu, W. (2021), Effects of transcranial direct current stimulation combined with physical training on the excitability of the motor cortex, physical performance, and motor learning: a systematic review, *Frontiers in Neuroscience*, vol. 15, p. 648354, [Online] URL: <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.648354>
29. Xiao, S., Wang, B., Zhang, X., Zhou, J. and Fu, W. (2020), Systematic review of the impact of transcranial direct current stimulation on the neuromechanical management of foot and ankle physical performance in healthy adults, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 8, p. 587680, [Online] URL: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.587680>
30. Yu, C., Xiao, S., Wang, B., Luo, J., Liu, C., Zhou, J. and Jin, J. (2022), Is Anodal Transcranial Direct Current Stimulation an Effective Ergogenic Technology in Lower Extremity Sensorimotor Control for Healthy Population? A Narrative Review, *Brain Sciences*, vol. 12, no. 7, p. 912, [Online] URL: <https://doi.org/10.3390/brainsci12070912>

