

<https://doi.org/10.47529/2223-2524.2021.3.7>

УДК 61:796/799

Тип статьи: Обзор литературы / Review



## Возможности использования транскраниальной стимуляции постоянным током (tDCS) в спорте высших достижений

С.И. Баршак<sup>1</sup>, М.Д. Дидур<sup>2</sup>, В.В. Завьялов<sup>1</sup>, О.В. Кара<sup>2</sup>, И. Н. Митин<sup>1</sup>,  
К.С. Назаров<sup>1</sup>, М.Г. Оганнисян<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр спортивной медицины и реабилитации Федерального медико-биологического агентства», Москва, Россия

<sup>2</sup> ФГБУН «Институт мозга человека им. Н. П. Бехтерева Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

### РЕЗЮМЕ

Транскраниальная стимуляция постоянным электрическим током малой интенсивности (tDCS) является методом воздействия, позволяющим модулировать функционирование центральной нервной системы и проводить профилактику и терапию различных неблагоприятных состояний, связанных с ее деятельностью. В связи с тем что существуют свидетельства эффективности данного метода в улучшении силовых показателей, скорости и точности реакции, повышении эффективности освоения моторных навыков, он представляется перспективным в спорте высших достижений. В настоящей работе приводится обзор исследований, посвященных методу tDCS и его влиянию на функционирование ЦНС с акцентом на потенциальную применимость в спорте. Демонстрируется, что базовым механизмом воздействия tDCS на функционирование ЦНС является ее способность влиять на возбудимость нейронов. Приводятся результаты исследований, показывающих, что tDCS способна влиять на различные компоненты электрокорковых потенциалов, на амплитуду моторного вызванного потенциала, а также на механизмы долговременной потенциации и, как следствие, на клеточные механизмы обучения двигательным навыкам и на процессы нейропластичности в целом. Отмечается благотворное влияние tDCS на избирательность внимания и на способность к обнаружению арифметических действий и решения проблемных задач. В контексте спорта важным представляется влияние электрической стимуляции моторных областей на процессы обучения двигательным навыкам и на точность произвольных движений. Также важным представляется способность этого метода влиять на скоростно-силовые показатели, а именно на максимальную силу изометрического сокращения различных групп мышц и на взрывную силу, а также на показатели выносливости. В обзоре также показано, что метод tDCS является достаточно безопасным и серьезные неблагоприятные эффекты встречаются крайне редко; наиболее часто встречающимся неблагоприятным эффектом является местное раздражение кожи из-за неоптимальной установки электродов.

**Ключевые слова:** спорт высших достижений, транскраниальная электрическая стимуляция постоянным током малой интенсивности, функциональные состояния

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Баршак С.И., Дидур М.Д., Завьялов В.В., Кара О.В., Митин И.Н., Назаров К.С., Оганнисян М.Г. Возможности использования транскраниальной стимуляции постоянным током (tDCS) в спорте высших достижений. *Спортивная медицина: наука и практика*. 2021;11(3):64–72. <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2021.3.7>

Поступила в редакцию: 01.09.2021

Принята к публикации: 20.09.2021

Online first: 25.09.2021

Опубликована: 30.09.2021

\* Автор, ответственный за переписку

## Possibilities of transcranial direct current stimulation (tDCS) use in elite sport

Sergey I. Barshak<sup>1</sup>, Mikhail D. Didur<sup>2</sup>, Vladimir V. Zavalov<sup>1</sup>, Olga V. Kara<sup>2</sup>, Igor N. Mitin<sup>1</sup>,  
Kirill S. Nazarov<sup>1</sup>, Mkrtych G. Ogannisyan<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Federal Research and Clinical Center of Sports Medicine and Rehabilitation of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

<sup>2</sup> N.P. Bekhtereva Institute of Human Brain of the Russian Academy of Sciences, Sant Petersburg, Russia

## ABSTRACT

Transcranial direct current stimulation has proven to be the method that can modulate neural activity in various cases. As this method has been shown to be effective in improving muscular strength, reaction time and accuracy, motor learning, it seems to be promising in elite sports. This paper provides an overview of studies on tDCS and its impact on central nervous system functioning, with an emphasis on potential sports utility.

This review demonstrates that the basic mechanism of the effect of tDCS on nervous system functioning is its ability to modulate the excitability of neurons.

tDCS is able to influence various components of electrocortical potentials, the amplitude of the motor evoked potential, as well as the mechanisms of long-term potentiation and, as a consequence, the cellular mechanisms of motor learning and neuroplasticity in general. The beneficial effect of tDCS on attention selectivity and signal detection has been noted. It is also shown that tDCS can accelerate learning and enhance performance in a range of complex cognitive tasks.

In addition, a number of studies showing that tDCS can increase the efficiency of performing arithmetic and problem solving tasks are considered.

In the context of sports, the influence of tDCS over motor areas on motor learning and on the accuracy of voluntary movements seems to be important. Its ability to influence speed and strength indicators, namely, the maximum isometric force of various muscle groups and explosive strength, as well as endurance indicators seems promising, too. The review also shows that tDCS is reasonably safe and that serious adverse effects are extremely rare; the most common adverse effect is local skin irritation due to poor electrode placement.

**Keywords:** elite athletes, transcranial direct current stimulation (tDCS), functional states

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Barshak S.I., Didur M.D., Zavialov V.V., Kara O.V., Mitin I.N., Nazarov K.S., Ogannisyan M.G. Possibilities of transcranial direct current stimulation (tDCS) use in elite sport. *Sportivnaya meditsina: nauka i praktika (Sports medicine: research and practice)*. 2021;11(3):64–72 (In Russ.). <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2021.3.7>

**Received:** 1 September 2021

**Accepted:** 20 September 2021

**Online first:** 25 September 2021

**Published:** 30 September 2021

\* Corresponding author

## 1. Введение

Спорт высших достижений — сфера деятельности человека, зачастую требующая от спортсмена невероятных усилий и сопряженная с экстремальными нагрузками, которые могут приводить к возникновению целого ряда неблагоприятных состояний. В этой связи представляется целесообразным использование вспомогательных психофизиологических методов, позволяющих смягчать неблагоприятные функциональные состояния (в том числе стрессового характера) у спортсменов, повышать эффективность тренировочного процесса и психофизиологическую готовность к нагрузкам. Одним из таких методов может выступать транскраниальная электрическая стимуляция коры головного мозга токами малой силы (tDCS). Несмотря на то что интерес к транскраниальной электростимуляции в последние годы существенно возрос, данный метод нельзя называть новым — история попыток применения электрического тока для воздействия на организм человека насчитывает не одно столетие. Существуют свидетельства использования электрических разрядов, вырабатываемых животными (скатами, сомами и т. п.), еще в древности. Так, о подобных опытах упоминают Платон, Аристотель, Скрибоний Ларг. Кроме того, подобные практики применялись лекарями Африки и Персии [1–4]. Безусловно, подобное использование электричества в лечебных целях носило крайне не систематический и мифологизированный характер.

Важной вехой в становлении метода явилось использование батареи постоянного электрического тока, изобретенной Луиджи Гальвани, его племянником Джованни Алдини для лечения пациентов с меланхолией и симптомами расстройств личности [4].

Относительно широкое и научно обоснованное применение метода началось в 50–60-х годах XX века. В это время были изучены некоторые физиологические механизмы электрической стимуляции. Так, Д. Бишоп и Д. О’Лири в экспериментах на животных установили, что электрическая стимуляция может изменять возбудимость клеток: скопления клеток, ориентированных в одном направлении относительно приложенного напряжения, демонстрируют повышенную возбудимость, если же тело клетки направлено в сторону электрического поля, возбудимость снижается [5]. В исследованиях О. Липполда и В. Редферна было показано изменение настроения добровольцев после процедуры электростимуляции [6].

Д. Пурпура и Д. Макмерти в работе, опубликованной в 1964 году, установили, что анодная поляризация ослабляет или устраняет поверхностно-положительные волны и усиливает поверхностно-негативные компоненты электро-корковых потенциалов, катодная же поляризация производит обратные изменения [7].

А. Приори и коллеги в исследовании 1998 года, посвященном влиянию кратковременной транскраниальной стимуляции слабыми токами (менее 0,5 А, 7 секунд) на моторный ответ, показали, что катодная tDCS снижает, а анодная — повышает амплитуду моторного вызванного потенциала [8].

Один из важнейших эффектов электростимуляции, по всей видимости, заключается в ее способности воздействовать на механизмы долговременной потенциации [9], а долговременная потенциация, в свою очередь, выступает как основной функциональный клеточный механизм обучения двигательным навыкам [10]. Б. Фритш и коллеги в исследовании 2010 года [11]

демонстрируют индуцированную долговременную потенциацию в мозге мышей, зависящую от полярности прикладываемого тока. Показано, что электростимуляция способна модулировать синтез некоторых нейротрофинов в нейроне (в частности, BDNF — нейротропного фактора мозга). Исследователи делают вывод, что метод может оптимизировать формы обучения путем увеличения нейропластичности моторной коры, зависимой от секреции BDNF.

Среди первых работ, в которых делается попытка определить влияние транскраниальной электростимуляции на психические и психомоторные функции человека, можно отметить исследования Т. Элберта и коллег и Д. Джегера. В статье 1981 года Т. Элберт описывает эксперимент, направленный на выявление влияния стимуляции на скорость сенсомоторного реагирования [12]. Исследователи выяснили, что испытуемые реагируют быстрее всего, когда положительный полюс (анод) прикладывался к темени.

В контексте спорта высших достижений наиболее интересным представляется возможное влияние метода tDCS на скоростно-силовые показатели, показатели выносливости, произвольного внимания, на процессы распознавания стимулов, точность движений, а также на эффективность обучения моторным навыкам.

Легкость в применении, мобильность, относительно низкая стоимость метода tDCS особенно привлекательны для решения задач спортивной подготовки. В то же время система современного тренировочного процесса выдвигает особые требования к протоколам воздействия, их безопасности и эффективности. В этом контексте необходимо понимание механизмов действия стимуляции и эффектов, которые этот метод может оказывать на психофизиологическое состояние спортсмена. В настоящей работе приводится обзор исследований, посвященных методу tDCS и его влиянию на функционирование ЦНС с акцентом на потенциальную применимость в спорте. Рассматривается влияние метода на произвольное внимание, распознавание стимулов, выполнение когнитивных задач, на точность произвольных движений и эффективность обучения моторным навыкам, а также на скоростно-силовые показатели и показатели выносливости.

## **2. Влияние tDCS на произвольное внимание, процессы распознавания стимулов и выполнение когнитивных задач**

Результаты метаанализа, проведенного группой ученых во главе с М. Салехинеджадом [13], говорят об эффективности применения транскраниальной электростимуляции постоянным током в смягчении симптомов синдрома дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ) у подростков и взрослых. Данные свидетельствуют о возможности снижения нейропсихологического дефицита у подростков и взрослых с помощью tDCS. Анодная электростимуляция дорсолатеральной префронтальной

коры головного мозга оказывает значимо больший эффект на ингибирующий контроль у рассматриваемого в метаанализе контингента испытуемых по сравнению с катодной или плацебо-стимуляцией. Также этот метод позволяет повышать точность и скорость реакции у взрослых и подростков, страдающих СДВГ, во время выполнения различных когнитивных задач [13].

Помимо исследований, посвященных влиянию tDCS на показатели внимания у испытуемых, страдающих СДВГ, было проведено немало исследований, посвященных влиянию этого метода на избирательность внимания, т.е. на способность сосредотачивать внимание на целевых объектах, одновременно игнорируя нецелевые, у здоровых испытуемых. Так, В. Кларк и соавторы [14] провели целый ряд исследований с применением компьютерной программы «Задача обнаружения угроз» (в оригинале — DARWARS Ambush! Threat Detection Task), используемой для тренировки американских военнослужащих. Испытуемым с помощью средств виртуальной реальности демонстрировались угрожающие и не угрожающие цели, скрытые в реалистичном окружении. Испытуемые военнослужащие, у которых проводилась анодная стимуляция нижней лобной извилины, правильно идентифицировали большее количество угрожающих целей, чем участники плацебо-группы (испытуемые, которые получали фиктивную tDCS), и допускали меньше «ложных тревог» (идентификацию не угрожающих целей как угрожающих). Данный эффект наблюдался как во время, так и сразу после сеанса стимуляции. Испытуемые, получавшие стимуляцию, выполняли задачу эффективнее, чем представители группы контроля, на протяжении четырех тренировочных блоков [14].

Д. Нельсон и соавторы [15] также изучали влияние электростимуляции на выполнение военнослужащими задач на обнаружение целевого стимула. Применение анодной стимуляции дорсолатеральной префронтальной коры головного мозга (анод — слева, катод — справа) приводило к увеличению количества правильно идентифицированных целей и уменьшению количества «ложных тревог», тогда как плацебо-воздействие не способствовало каким-либо изменениям. Однако, вместе с тем, воздействие также приводило к замедлению скорости реакции [15].

В исследованиях Т. Глэдвина и коллег доказано, что электрическая стимуляция дорсолатеральной префронтальной коры способствует улучшению показателей избирательности внимания в задачах с отвлекающим стимулом [16].

Интересно рассмотреть влияние метода tDCS на решение испытуемыми сложных когнитивных задач, требующих принятия решений, выбора из нескольких альтернатив, выполнения арифметических действий, задействования творческого потенциала и т. п. В метаанализе Р. Парасумарана и Р. МакКинли показано, что tDCS может ускорять обучение и повышать эффективность

выполнения целого комплекса сложных когнитивных задач как в лабораторных, так и в приближенных к естественным условиям, при этом эффект от стимуляции может сохраняться на протяжении достаточно долгого времени [17].

В исследовании Р. Чи и А. Снайдера было изучено влияние tDCS на процесс решения проблемных задач и явление инсайта. Показано, что сочетание катодной стимуляции задних отделов височных областей правого полушария и анодной стимуляции контралатеральных отделов левого полушария во время выполнения задач на решение проблем может значимо повышать вероятность возникновения у испытуемого инсайта [18].

Д. Джегер и коллеги, в свою очередь, провели ряд исследований, посвященных влиянию полярности тока на тактильное распознавание [19]. Авторы выявили улучшение качества реагирования, если источник тока является противоположным по отношению к отвечающей руке. Влияние постоянного тока на латерализацию было подтверждено в другом исследовании, где испытуемые должны были нажимать кнопку любой рукой в ответ на предъявление звукового тона длительностью в 100 мс. Исследователи делают вывод о том, что мозговые процессы могут быть избирательно изменены путем применения электрического тока.

Другие примеры улучшения эффективности выполнения поведенческих задач с применением стимуляции tDCS в различных когнитивных и перцептивных областях можно найти в работах К. Кадоша [20], И. Сантиэстебана [21], П. Тсенга [22].

Таким образом, учитывая, что, согласно данным литературных источников, метод tDCS позволяет улучшать показатели произвольного внимания, облегчать распознавание стимулов, повышать эффективность решения когнитивных задач, видится целесообразным его применение в видах спорта, требующих высокой скорости реакции, концентрации внимания, быстрого принятия решений. К таким видам спорта относятся, например, единоборства, командные виды, теннис, автоспорт, парусный спорт, стрельба разных видов.

### **3. Влияние TDCS на точность движений и эффективность обучения моторным навыкам**

Исследования, посвященные влиянию tDCS на процессы обучения двигательным навыкам, начались достаточно давно. Так, М. Нитше и соавторы исследовали влияние электростимуляции на моторное обучение, используя модифицированную версию теста на время последовательных реакций (в оригинале — Serial Reaction Time Task (SRTT)). Испытуемые, получающие анодную tDCS моторной области M1, быстрее выполняли выученные двигательные последовательности по сравнению с испытуемыми, получающими стимуляцию премоторной или префронтальной области [23].

В исследованиях А. Антала и коллег электростимуляция зоны M1 головного мозга улучшала выполнение

задачи на повторение отслеживаемых движений [24]. При этом эффект наблюдался для обеих полярностей tDCS в тех случаях, когда стимуляция применялась до обучения. Более того, показано, что как односторонняя, так и двусторонняя стимуляция постоянным током зоны M1, примененная одновременно с выполнением задачи отслеживания движений, приводит к повышению точности отслеживания и, соответственно, последующего повторения движения [25].

В работе С. Стэга и коллег [26] установлено, что применение tDCS во время обучения выполнению последовательности двигательных действий у здоровых людей приводит к повышению эффективности обучения, при этом эффект неодинаков при разных полярностях электродов. По данным авторов, анодная стимуляция повышает, а катодная — снижает скорость обучения. Интересно, что применение стимуляции до выполнения задачи в этом исследовании приводило к ухудшению эффективности обучения независимо от полярности. Полученные авторами данные иллюстрируют важность выбора времени стимуляции для улучшения выполнения задач, их освоения и консолидации навыка.

Аналогично выводам С. Стэга, М. Куо и коллег [27] обнаружили, что двигательное обучение ухудшается при применении анодной tDCS до выполнения задания. При этом, согласно данным Ф. Теккио, стимуляция после обучения приводит к улучшению консолидации навыка [28]. Последнее говорит о том, что следует избегать стимуляции до выполнения задачи, если целью является повышение эффективности ее освоения. Это обстоятельство стоит учитывать при использовании tDCS в работе со спортсменами.

В достаточно большом количестве исследований отмечается влияние tDCS на выполнение различных двигательных задач недоминантной рукой. Так, Б. Вайнс и коллеги [29] исследовали влияние стимуляции на выполнение задачи воспроизведения последовательности движений пальцев. В исследовании приняли участие 17 здоровых испытуемых-правшей, не обладающих профессиональными навыками в сфере мелкой моторики (печать на машинке, игра на музыкальных инструментах, и т. п.). Оказалось, что анодная стимуляция недоминантной зоны M1 головного мозга в сочетании с катодом на доминантной зоне M1 головного мозга может повышать точность выполнения задачи недоминантной (левой) рукой у здоровых испытуемых.

А. Матсуо [30] и коллеги исследовали влияние tDCS на точность движений при выполнении задачи рисования круга недоминантной (левой у правшей) рукой. В исследовании приняли участие 14 здоровых испытуемых в возрасте от 20 до 22 лет. Задача рисования круга выполнялась до, сразу после и через 30 минут после 20-минутного сеанса анодной или плацебо-стимуляции. По сравнению с сеансом плацебо-воздействия анодная стимуляция значительно улучшила качество выполнения задачи. Эти результаты свидетельствуют о том,

что анодная tDCS первичной моторной коры головного мозга может улучшать точность движений недоминирующей кисти у здоровых испытуемых.

Влияние tDCS на точность движений наблюдается и в условиях, близких к естественным. Так, П. Боджио и соавторы исследовали влияние tDCS на выполнение моторных задач, приближенных к повседневной двигательной активности [31]. Оценка моторных функций проводилась с помощью теста Джебсена Тейлора (инструмент для оценки функций руки). В исследовании приняли участие 8 здоровых испытуемых в возрасте 22–26 лет с ведущей правой рукой. Было выявлено, что испытуемые быстрее выполняют тест левой рукой в том случае, если тесту предшествует анодная стимуляция правой (недоминантной) зоны M1 головного мозга. Подобных эффектов при выполнении заданий правой (доминантной) рукой не наблюдалось [31]. Аналогичные данные были получены в исследованиях Д. Уильямса [32] и Ф. Хаммела [33].

Таким образом, метод tDCS позволяет повышать эффективность и скорость обучения моторным навыкам, а также улучшать показатели точности произвольных движений. Эффект повышения эффективности обучения моторным навыкам может быть полезен практически во всех видах спорта, в особенности в сложнокоординационных, в таких как, например, спортивная гимнастика, танцевальный спорт, фристайл, фигурное катание. Эффект повышения точности произвольных движений недоминантной рукой также может быть полезен в некоторых дисциплинах, требующих высокой точности выполнения движений недоминантной рукой, в таких как, например, стрельба.

#### **4. Влияние TDCS на скоростно-силовые показатели и показатели выносливости**

Повышение скоростно-силовых показателей с помощью метода транскраниальной стимуляции электрическим током малой силы исследовалось рядом ученых. Так, коллектив во главе с Э. Латтари [34] в 2018 году провел обширное аналитическое исследование, посвященное влиянию разовых доз tDCS на мышечную силу руки у взрослых здоровых испытуемых. Исследуемый протокол воздействия заключался в стимуляции нескольких отделов головного мозга: 1) моторной коры; 2) дорсолатеральной префронтальной коры; 3) височной коры с применением кольцевого расположения 4 электродов вокруг центрального электрода в районе представителя руки в моторной коре [34]. Авторы пришли к выводу о неярко выраженном усиливающем влиянии электростимуляции на максимальную силу изометрического сокращения мышц руки у взрослых здоровых испытуемых.

Аналогичные исследования проводились и с целью выявления возможных влияний tDCS на силовые показатели других групп мышц. Так, в исследовании Ф. Хазиме и коллег [35] показано, что применение

электростимуляции приводит к повышению максимальной силы изометрического сокращения внутренних и внешних мышц-вращателей плеч спортсменов-гандболистов. В. Варгас и коллеги [36] демонстрируют прирост данного показателя для мышц-разгибателей колена с ведущей стороны на выборке спортсменов-футболистов. Вероятно, стимуляция постоянным электрическим током способна временно улучшать силовые характеристики выше их обычного уровня даже у спортсменов [31, 37, 38].

В работах С. Танаки [39] показано, что во время tDCS моторных представительств ноги в коре головного мозга у взрослых здоровых испытуемых происходит прирост силы сжатия мышц ступни. Более позднее исследование группы С. Танаки показало, что подобным образом можно увеличивать силу выпрямления колена, хотя продолжительность эффекта в этом случае оказывается несколько меньше, чем в предыдущем случае [40].

Изучая влияние электростимуляции на взрывную силу, Е. Латтари и коллеги [41] измеряли максимальную высоту прыжка с помощью теста на выпрыгивание с места вверх (в оригинале — *countermovement jump performance*) у испытуемых после анодной, катодной стимуляции, а также имитации стимуляции. Все участники, подвергавшиеся анодному воздействию перед тестированием, показали улучшение результатов по сравнению с контрольным тестом. Участники двух других групп не показали значимых различий между двумя срезами.

Научная группа под руководством Л. Ангиуса провела исследование, посвященное влиянию tDCS на выносливость [42]. Было показано, что анодная стимуляция дорсолатеральной префронтальной коры левого полушария может повышать показатели выносливости у испытуемых в тестах на велотренажере.

Способность метода tDCS повышать скоростно-силовые показатели и показатели выносливости представляется целесообразной в целом ряде видов спорта. В особенности это касается скоростно-силовых и циклических видов спорта, таких как тяжелая атлетика, бег, пауэрлифтинг, прыжки в длину и в высоту, а также командных видов спорта, таких как, например, футбол.

#### **5. Безопасность применения TDCS и нежелательные эффекты**

В 2018 году международным коллективом ученых во главе с А. Анталом выпущена масштабная работа, посвященная безопасности, а также этике и легальности использования tDCS [43]. В работе обозначен ряд неблагоприятных случаев, зафиксированных в литературе. Доказано, что метод tDCS не приводит к серьезным побочным эффектам, тем не менее в небольшом числе случаев могут встречаться умеренно выраженные нежелательные эффекты. Так, во время проведения процедуры могут отмечаться легкие покалывания, слабовыраженные фосфены в момент начала и окончания стимуляции.

У некоторых испытуемых после проведения сеансов высокой интенсивности могут отмечаться местные раздражения. Редко встречающимися симптомами являются легкая усталость. Крайне редко встречаются головная боль, тошнота, бессонница [43].

Часть отмечающихся субъективных эффектов связаны с самовнушением и тревогой испытуемых, однако показано, что в группе испытуемых, получающих реальную стимуляцию, частота субъективных неблагоприятных эффектов статистически значимо выше, чем в группе получающих имитацию стимуляции [44].

Среди факторов, способных провоцировать возникновение местных нежелательных эффектов, называют следующие: неправильная установка электрода, аллергия на кремы для кожи, износ электрода, недостаточное количество раствора, недостаточно высокая соленость раствора, большая длительность или частота сеансов, высокая плотность тока [43, 44].

Для минимизации риска предлагается следовать определенным рекомендациям. Раздражение можно предотвратить путем наилучшей подготовки кожи и электрода. Абразивная обработка кожи перед фиксацией электрода не рекомендуется, предлагается использовать только легкую чистку подушечкой, если это необходимо [45]. Следует избегать применения стимуляции

на неоднородных (например, шрамах) или воспаленных участках кожи. Испытуемые должны быть проинструктированы немедленно сообщать о дискомфорте, особенно когда используются высокие интенсивности тока.

### 6. Заключение

В настоящем обзоре были рассмотрены основные исследования, посвященные различным вариантам применения метода транскраниальной стимуляции постоянным током низкой силы, которые могут использоваться для оптимизации и модуляции когнитивных функций у различных групп спортсменов. Основные протоколы стимуляции, применимые в спорте высших достижений, а также ожидаемые эффекты применения этих протоколов перечислены в таблице. Положения электродов на поверхности головы приводятся либо в соответствии с названиями зон коры головного мозга, либо в соответствии со стандартными расположениями электродов энцефалограммы по международной системе 10–20 (либо 10–10).

В части исследований установлено, что метод tDCS может использоваться для улучшения выполнения перцептивных, когнитивных задач, он может повышать точность распознавания объектов и скорость реакции, а также повышать избирательность внимания [12–16]. Подобный эффект этого метода может быть полезен

Таблица 1

### Общие рекомендации и протоколы применения tDCS

Table 1

#### General tDCS recommendations and protocols

Схема расположения электродов на теле		Характеристики воздействия		Ожидаемый эффект	Литературный источник
Анод	Катод	Ток (mA)	Время (мин)		
F10* или FC6*	Плечо	2	30	Ускорение обучения	[17]
R4*	Плечо	2	30	Ускорение обучения	[14]
C3*	C4*	2	30	Улучшение моторных функций и обучения	[29]
Первичная моторная кора	Плечо	2	30	Ускорение обучения моторным навыкам	[23]
Моторная зона, соответствующая интересующей конечности	Кольцевое расположение вокруг анода			Повышение мышечной силы	[34]
T4*	T3*	2	30	Улучшение когнитивных функций, решение проблем, инсайт, креативность, восприятие звука	[18]
F3*	Fp2*	2	30	Улучшение исполнительного контроля и выносливости	[42]
Fp1* или Fp2*	Плечо	2	30	Улучшение внимания, запоминания и обучения	[15, 16]

Примечание: \* — обозначения энцефалографических отведений по международной системе 10–20 (или 10–10).

Note: \* — designations of encephalographic leads according to the international system 10–20 (or 10–10).

в видах спорта, требующих высокой концентрации, точности и скорости реакции, быстрого принятия решения (как то: игровые виды спорта, стрельба, единоборства и т. п.).

Результаты нескольких исследований доказывают, что при правильном использовании метод может ускорять обучение моторным навыкам, облегчать процесс консолидации навыка [11, 23, 26–28]. Это говорит о том, что метод tDCS может использоваться для повышения эффективности тренировочного процесса. Повышение скорости освоения моторных навыков позволит спортсмену тратить меньшее число повторений на отработку определенных спортивных действий, что в итоге приведет к более рациональному расходованию энергетического ресурса спортсмена и времени, отведенного на тренировки.

Крайне полезным в спорте высших достижений представляется влияние метода tDCS на скоростно-силовые

**Вклад авторов:**

**Баршак Сергей Игоревич** — поиск и анализ источников, написание текста.

**Дидур Михаил Дмитриевич** — поиск и анализ источников, общее редактирование.

**Завьялов Владимир Владимирович** — поиск и анализ источников, общее редактирование.

**Кара Ольга Викторовна** — поиск и анализ источников, общее редактирование.

**Митин Игорь Николаевич** — написание текста, общее редактирование.

**Назаров Кирилл Сергеевич** — поиск и анализ источников, написание текста.

**Оганнисян Мкртыч Гагикович** — написание текста, общее редактирование.

**References**

1. **Sarmiento C., San-Juan D., Prasath V.** Letter to the Editor: Brief history of transcranial direct current stimulation (tDCS): from electric fishes to microcontrollers. *Psychol. Med.* 2016;46(15):3259–3261. <https://doi.org/10.1017/S0033291716001926>
2. **Priori A.** Brain polarization in humans: a reappraisal of an old tool for prolonged non-invasive modulation of brain excitability. *Clin. Neurophysiol.* 2003;114(4):589–595. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(02\)00437-6](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(02)00437-6)
3. **Delbourgo J.** A most amazing scene of wonders: electricity and enlightenment in early America. Cambridge: Harvard University Press; 2006. 367 p.
4. **Fitzgerald P.B.** Transcranial pulsed current stimulation: a new way forward? *Clin. Neurophysiol.* 2013;125(2):217–219. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2013.10.009>
5. **Bishop G.H., O’Leary J.L.** The effects of polarizing currents on cell potentials and their significance in the interpretation of central nervous system activity. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1950;2(1-4):401–416. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(50\)90077-0](https://doi.org/10.1016/0013-4694(50)90077-0)
6. **Lippold O., Winton L., Redfearn J.** Potential level at surface of cerebral cortex of rat and its relation to cortical activity evoked by sensory stimulation. *J. Physiol.* 1961;157:7.

показатели, в частности силу кисти, высоту выпрыгивания, силу мышц ног и т. п. [34–36, 39–41], а также показатели выносливости [42]. Данный эффект представляется особенно важным в контексте скоростно-силовых и циклических видов спорта.

Метод tDCS лишен серьезных побочных эффектов, при правильном использовании вероятность незначительных неблагоприятных эффектов также невысока [43–45].

Таким образом, существует целый ряд возможностей для применения метода транскраниальной стимуляции постоянным током низкой силы в спорте высших достижений.

Группой специалистов Центра спортивной медицины ФМБА России проводятся исследования по применению метода tDCS в рамках спортивных сборных команд России. Результаты этих исследований будут представлены в последующих публикациях.

**Authors’ contributions:**

**Sergey I. Barshak** — search and analysis of sources, text writing.

**Mikhail D. Didur** — search and analysis of sources, editing.

**Vladimir V. Zavalov** — search and analysis of sources, editing.

**Olga V. Kara** — search and analysis of sources, editing.

**Igor N. Mitin** — text writing, editing.

**Kirill S. Nazarov** — search and analysis of sources, text writing.

**Mkrtych G. Ogannisyan** — text writing, editing.

7. **Purpura D.P., McMurtry J.G.** Intracellular activities and evoked potential changes during polarization of motor cortex. *J. Neurophysiol.* 1965;28(1):166–185. <https://doi.org/10.1152/jn.1965.28.1.166>
8. **Priori A., Berardelli A., Rona S., Accornero N., Manfredi M.** Polarization of the human motor cortex through the scalp. *Neuroreport.* 1998;9(10):2257–2260. [10.1097/00001756-199807130-00020](https://doi.org/10.1097/00001756-199807130-00020)
9. **Gellner A.-K., Reis J., Holtick C., Schubert C., Fritsch B.** Direct current stimulation-induced synaptic plasticity in the sensorimotor cortex: structure follows function. *Brain Stimul.* 2020;13(1):80–88. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.07.026>
10. **Rioult-Pedotti M.-S., Friedman D., Donoghue J.P.** Learning-induced LTP in neocortex. *Science.* 2000;290(5491):533–536. <https://doi.org/10.1126/science.290.5491.533>
11. **Fritsch B., Reis J., Martinowich K., Schambra H.M., Ji Y., Cohen L.G., Lu B.** Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: potential implications for motor learning. *Neuron.* 2010;66(2):198–204. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.03.035>
12. **Elbert T., Lutzenberger W., Rockstroh B., Birbaumer N.** The influence of low-level transcranial DC-currents on response speed in humans. *Int. J. Neurosci.* 1981;14(1-2):101–114. <https://doi.org/10.3109/00207458108985821>

13. Salehinejad M.A., Wischnewski M., Nejati V., Vicario C.M., Nitsche M.A. Transcranial direct current stimulation in attention-deficit hyperactivity disorder: a meta-analysis of neuropsychological deficits. *PLoS One*. 2019;14(4):e0215095. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215095>
14. Clark V.P., Coffman B.A., Mayer A.R., Weisend M.P., Lane T.D., Calhoun V.D., et al. TDCS guided using fMRI significantly accelerates learning to identify concealed objects. *Neuroimage*. 2012;59(1):117–128. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.036>
15. Nelson J.T., McKinley R.A., Golob E.J., Warm J.S., Parasuraman R. Enhancing vigilance in operators with prefrontal cortex transcranial direct current stimulation (tDCS). *Neuroimage*. 2014;85:909–917. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.11.061>
16. Gladwin T.E., Uyl T.E. den, Fregni F.F., Wiers R.W. Enhancement of selective attention by tDCS: interaction with interference in a Sternberg task. *Neurosci. Lett*. 2012;512(1):33–37. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2012.01.056>
17. Parasuraman R., McKinley R.A. Using noninvasive brain stimulation to accelerate learning and enhance human performance. *Hum. factors*. 2014;56(5):816–824. <https://doi.org/10.1177/0018720814538815>
18. Chi R.P., Snyder A.W. Facilitate insight by non-invasive brain stimulation. *PLoS One*. 2011;6(2):e16655. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016655>
19. Jaeger D., Elbert T., Lutzenberger W., Birbaumer N. The effects of externally applied transcranial weak direct currents on lateralization in choice reaction tasks. *J. Psychophysiol*. 1987;1(2):127–133.
20. Kadosh R.C., Soskic S., Iuculano T., Kanai R., Walsh V. Modulating neuronal activity produces specific and long-lasting changes in numerical competence. *Curr. Biol*. 2010;20(22):2016–2020. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.10.007>
21. Santiesteban I., Banissy M.J., Catmur C., Bird G. Enhancing social ability by stimulating right temporoparietal junction. *Curr. Biol*. 2012;22(23):2274–2277. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.10.018>
22. Tseng P., Hsu T.-Y., Chang C.-F., Tzeng O.J., Hung D.L., Muggleton N.G., et al. Unleashing potential: transcranial direct current stimulation over the right posterior parietal cortex improves change detection in low-performing individuals. *J. Neurosci*. 2012;32(31):10554–10561. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0362-12.2012>
23. Nitsche M.A., Schauenburg A., Lang N., Liebetanz D., Exner C., Paulus W., Tergau F. Facilitation of implicit motor learning by weak transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex in the human. *J. Cogn. Neurosci*. 2003;15(4):619–626. <https://doi.org/10.1162/089892903321662994>
24. Antal A., Boros K., Poreisz C., Chaieb L., Terney D., Paulus W. Comparatively weak after-effects of transcranial alternating current stimulation (tACS) on cortical excitability in humans. *Brain Stimul*. 2008;1(2):97–105. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2007.10.001>
25. Naros G., Geyer M., Koch S., Mayr L., Ellinger T., Grimm F., Gharabaghi A. Enhanced motor learning with bilateral transcranial direct current stimulation: impact of polarity or current flow direction? *Clin. Neurophysiol*. 2016;127(4):2119–2126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.12.020>
26. Stagg C., Jayaram G., Pastor D., Kincses Z., Matthews P., Johansen-Berg H. Polarity and timing-dependent effects of transcranial direct current stimulation in explicit motor learning. *Neuropsychologia*. 2011;49(5):800–804. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.02.009>
27. Kuo M.-F., Unger M., Liebetanz D., Lang N., Tergau F., Paulus W., Nitsche M.A. Limited impact of homeostatic plasticity on motor learning in humans. *Neuropsychologia*. 2008;46(8):2122–2128. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.02.023>
28. Tecchio F., Zappasodi F., Assenza G., Tombini M., Vol-laro S., Barbati G., Rossini P.M. Anodal transcranial direct current stimulation enhances procedural consolidation. *J. Neurophysiol*. 2010;104(2):1134–1140. <https://doi.org/10.1152/jn.00661.2009>
29. Vines B.W., Nair D., Schlaug G. Modulating activity in the motor cortex affects performance for the two hands differently depending upon which hemisphere is stimulated. *Eur. J. Neurosci*. 2008;28(8):1667–1673. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2008.06459.x>
30. Matsuo A., Maeoka H., Hiyamizu M., Shomoto K., Morioka S., Seki K. Enhancement of precise hand movement by transcranial direct current stimulation. *Neuroreport*. 2011;22(2):78–82. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e32834298b3>
31. Boggio P.S., Castro L.O., Savagim E.A., Braitte R., Cruz V.C., Rocha R.R., et al. Enhancement of non-dominant hand motor function by anodal transcranial direct current stimulation. *Neurosci. Lett*. 2006;404(1-2):232–236. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2006.05.051>
32. Williams J.A., Pascual-Leone A., Fregni F. Interhemispheric modulation induced by cortical stimulation and motor training. *Phys. Ther*. 2010;90(3):398–410. <https://doi.org/10.2522/ptj.20090075>
33. Hummel F.C., Heise K., Celnik P., Floel A., Gerloff C., Cohen L.G. Facilitating skilled right hand motor function in older subjects by anodal polarization over the left primary motor cortex. *Neurobiol. Aging*. 2010;31(12):2160–2168. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2008.12.008>
34. Lattari E., Oliveira B.R., Monteiro Júnior R.S., Marques Neto S.R., Oliveira A.J., Maranhao Neto G.A., Machado S., Budde H. Acute effects of single dose transcranial direct current stimulation on muscle strength: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*. 2018;13(12):e0209513. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209513>
35. Hazime F.A., Cunha R.A. da, Soliaman R.R., Romancini A.C.B., Castro Pochini A. de, Ejnisman B., Baptista A.F. Anodal transcranial direct current stimulation (TDCS) increases isometric strength of shoulder rotators muscles in handball players. *Int. J. Sports Phys. Ther*. 2017;12(3):402.
36. Vargas V.Z., Baptista A.F., Pereira G.O., Pochini A.C., Ejnisman B., Santos M.B., et al. Modulation of isometric quadriceps strength in soccer players with transcranial direct current stimulation: a crossover study. *J. Strength Cond. Res*. 2018;32(5):1336–1341. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001985>
37. Fregni F., Boggio P.S., Mansur C.G., Wagner T., Ferreira M.J., Lima M.C., et al. Transcranial direct current stimulation of the unaffected hemisphere in stroke patients. *Neuroreport*. 2005;16(14):1551–1555. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000177010.44602.5e>
38. Hummel F., Celnik P., Giraux P., Floel A., Wu W.-H., Gerloff C., Cohen L.G. Effects of non-invasive cortical stimulation on skilled motor function in chronic stroke. *Brain*. 2005;128(3):490–499. <https://doi.org/10.1093/brain/awh369>
39. Tanaka S., Hanakawa T., Honda M., Watanabe K. Enhancement of pinch force in the lower leg by anodal transcranial direct current stimulation. *Exp. Brain Res*. 2009;196(3):459–465. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1863-9>
40. Tanaka S., Takeda K., Otaka Y., Kita K., Osu R., Honda M., et al. Single session of transcranial direct current stimulation



transiently increases knee extensor force in patients with hemiparetic stroke. *Neurorehabil. Neural Repair.* 2011;25(6):565–569. <https://doi.org/10.1177/1545968311402091>

41. **Lattari E., Campos C., Lamego M.K., Legey S., Neto G.M., Rocha N.B., Oliveira A.J., et al.** Can transcranial direct current stimulation improve muscle power in individuals with advanced weight-training experience? *J. Strength Cond. Res.* 2020;34(1):97–103. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001956>

42. **Angius L., Santarnecchi E., Pascual-Leone A., Marco-  
ra S.M.** Transcranial direct current stimulation over the left dorso-lateral prefrontal cortex improves inhibitory control and endurance performance in healthy individuals. *Neuroscience.* 2019;419:34–45. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.08.052>

43. **Antal A., Alekseiuk I., Bikson M., Brockmüller J., Brunoni A.R., Chen R., et al.** Low intensity transcranial electric stimulation: safety, ethical, legal regulatory and application guidelines. *Clin. Neurophysiol.* 2017;128(9):1774–1809. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.06.001>

44. **Kessler S.K., Turkeltaub P.E., Benson J.G., Hamilton R.H.** Differences in the experience of active and sham transcranial direct current stimulation. *Brain Stimul.* 2012;5(2):155–162. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.02.007>

45. **Loo C., Martin D., Alonzo A., Gandevia S., Mitchell P., Sachdev P.** Avoiding skin burns with transcranial direct current stimulation: preliminary considerations. *Int. J. Neuropsychopharmacol.* 2011;14(3):425–426. <https://doi.org/10.1017/S1461145710001197>

**Информация об авторах:**

**Сергей Игоревич Баршак**, медицинский психолог отдела медико-психологического обеспечения спортивных сборных команд России ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр спортивной медицины и реабилитации Федерального медико-биологического агентства», 121059, Россия, Москва, Большая Дорогомиловская ул., 5. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3609-7396>

**Михаил Дмитриевич Дидур**, д.м.н., профессор, директор ФГБУН «Институт мозга человека им. Н. П. Бехтерева Российской академии наук», 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, 12а. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4086-5992>

**Владимир Владимирович Завьялов**, врач по спортивной медицине отдела медицинского обеспечения спортивных сборных команд и соревнований ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр спортивной медицины и реабилитации Федерального медико-биологического агентства», 121059, Россия, Москва, Большая Дорогомиловская ул., 5. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6567-0118>

**Ольга Викторовна Кара**, к.б.н., научный сотрудник ФГБУН «Институт мозга человека им. Н. П. Бехтерева Российской академии наук», 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, 12а. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5895-3053>

**Игорь Николаевич Митин**, к.м.н., ведущий научный сотрудник организационно-исследовательского отдела ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр спортивной медицины и реабилитации Федерального медико-биологического агентства», 121059, Россия, Москва, Большая Дорогомиловская ул., 5. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2168-921X>

**Кирилл Сергеевич Назаров**, психолог отдела медико-психологического обеспечения спортивных сборных команд России ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр спортивной медицины и реабилитации Федерального медико-биологического агентства», 121059, Россия, Москва, Большая Дорогомиловская ул., 5. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1147-6437>

**Мкртчяк Гагикович Оганнисян\***, к.б.н., старший научный сотрудник организационно-исследовательского отдела ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр спортивной медицины и реабилитации Федерального медико-биологического агентства», 121059, Россия, Москва, Большая Дорогомиловская ул., 5. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7074-5337> (ogannisyamng@sportfmba.ru)

**Information about the authors:**

**Sergey I. Barshak**, medical psychologist of the Department of Medical and Psychological Support of Sports Teams of the Russian Federation of the Federal Research and Clinical Center of Sports Medicine and Rehabilitation of Federal Medical Biological Agency, 5, Bolshaya Dorogomilovskaya str., Moscow, 121059, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3609-7396>

**Mikhail D. Didur**, M.D., D.Sc. (Medicine), Professor, Director of N.P. Bekhtereva Institute of Human Brain of the Russian Academy of Sciences, 12a, Akademian Pavlov str., Saint Petersburg. 197367, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4086-5992>

**Vladimir V. Zavyalov**, M.D., sports medicine doctor of the Department of Medical Support for Sports Teams and Competitions, Federal Research and Clinical Center of Sports Medicine and Rehabilitation of Federal Medical Biological Agency, 5, Bolshaya Dorogomilovskaya str., Moscow, 121059, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6567-0118>

**Olga V. Kara**, Ph.D. (Biology), researcher, N.P. Bekhtereva Institute of Human Brain of the Russian Academy of Sciences, 12a, Akademian Pavlov str., Saint Petersburg. 197367, Russia ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5895-3053>

**Igor N. Mitin**, M.D., Ph.D. (Medicine), leading researcher of organizational research department, Federal Research and Clinical Center of Sports Medicine and Rehabilitation of Federal Medical Biological Agency, 5, Bolshaya Dorogomilovskaya str., Moscow, 121059, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2168-921X>

**Kirill S. Nazarov**, psychologist of the Department of Medical and Psychological Support of Sports Teams of the Russian Federation, Federal Research and Clinical Center of Sports Medicine and Rehabilitation of Federal Medical Biological Agency, 5, Bolshaya Dorogomilovskaya str., Moscow, 121059, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1147-6437>

**Mkrтчich G. Ogannisyam\***, Ph.D. (Biology), senior researcher of organizational research department, Federal Research and Clinical Center of Sports Medicine and Rehabilitation of Federal Medical Biological Agency, 5, Bolshaya Dorogomilovskaya str., Moscow, 121059, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7074-5337> (ogannisyamng@sportfmba.ru)

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author